



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(9), 627-638(2022)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.9.627>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

무인이동체 산업의 실제 고장사례에 대한 영향성 분석 및 고장대응기술 적용방안

김예지¹, 김태균², 김승균³, 김유단⁴, 황인성⁵

Influence Analysis of Actual Fault Cases in Unmanned Vehicle Industry and Study on Fault Tolerant Technology

Yeji Kim¹, Taegyun Kim², Seungkeun Kim³, Youdan Kim⁴ and Inseong Hwang⁵

Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea¹⁻³

Seoul National University, Seoul, Republic of Korea⁴

Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Republic of Korea⁵

ABSTRACT

This paper discusses the utilization of fault-tolerant technology in the industry by analyzing the status of drone failures in the unmanned vehicle industry survey conducted in 2020. Based on the survey results of the domestic unmanned vehicle industry, we identify subsystems with high fault rates and high severity when faults occur. In addition, fault simulations of the identified subsystems are conducted to analyze the effect of the fault on the vehicles. After that, the fault diagnosis and fault compensation methods studied so far are reviewed, and research cases of the methods are examined. Moreover, the ways to apply it to actual fault cases in the unmanned vehicle industry are debated. Furthermore, based on the previous discussion, the fault-tolerant system is presented, and the consideration when designing the fault-tolerant system in the industry are studied.

초 록

본 논문은 2020년에 실시한 무인이동체 산업실태조사의 드론 고장 발생현황에 대한 설문내용을 분석하여 산업계에서의 고장대응기술의 활용성에 대해 논하고자 한다. 먼저, 국내 무인이동체 산업실태조사 결과를 기반으로 고장률이 높고, 고장 발생 시 심각도가 높은 하위시스템(Subsystem)을 파악한다. 또한 공중 무인이동체를 대상으로 고장률이 높은 부품에 대한 고장 시뮬레이션을 수행한다. 이를 통해 고장이 무인이동체에 미치는 영향에 대해 분석한다. 이후 현재까지 연구된 고장진단 및 고장대응 기법과 연구사례를 소개하며, 무인이동체 산업의 실 고장사례에 적용하기 위한 방안에 대해 논의한다. 나아가 앞서 논의한 내용을 기반으로 고장대응체계를 제시하고, 산업계에서 고장대응체계 설계 시에 고려해야 할 사항에 대해 살펴본다.

Key Words : Unmanned Vehicle(무인이동체), Fault Diagnosis(고장진단), Fault Tolerant Control(고장 허용제어), Actuator Fault(구동기 고장), Sensor Fault(센서 고장)

1. 서 론

무인이동체(Unmanned Vehicle)는 육상, 해양, 공중 분야에 걸쳐 널리 사용되며 개발되고 있다. 최근에는 군

용은 물론, 농업 및 조업과 같은 1차 산업용, 운송용, 공공 서비스용, 국토 및 인프라 관리용, 촬영 및 오락용 등 다양한 형태의 무인이동체가 출현하고 있다[1]. 특히 도심 배송용으로 활용하고자 하는 움직임이 활발하다. 아

† Received : April 19, 2022 Revised : June 26, 2022 Accepted : July 14, 2022

¹ Graduate Student, ² Ph.D Candidate, ^{3,4} Professor, ⁵ Senior Research Engineer

³ Corresponding author, E-mail : skim78@cnu.ac.kr, ORCID 0000-0001-6163-622X

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

마존(Amazon), 구글(Google), DHL, 알리바바(Alibaba) 등의 기업에서는 무인이동체인 드론을 이용한 택배 서비스 사업을 추진하고 있다. 이 외에도 대도시 지상교통혼잡의 해결 수단으로서 eVTOL(Electric Vertical Take-off and Landing) 항공기를 이용한 도심항공교통 개념도 주목을 받고 있다. 이렇듯 무인이동체의 운용 범위가 점차 도심지로 확대되고 있다. 하지만 도심지에서 운용되는 공중 무인이동체의 경우 2,000ft 이하의 저고도로 도심 상공에서 운용될 예정이라 도심지에 추락할 경우 인명 피해 등 2차 피해가 발생할 확률이 높다는 문제가 있다[2]. 실제 도심 지역 비행을 위한 소형무인기의 고장 빈도를 분석한 연구를 보면 10^{-6} 이하의 성능을 가져야 해당 지역의 모든 공역을 비행할 수 있음을 알 수 있는데, 이는 약 114년의 비행 동안 1번의 고장이 발생하는 수준이다[3]. 이를 통해 무인이동체의 운용 범위가 도심 지역으로 확장됨에 따라 높은 수준의 안전성과 신뢰성이 요구됨을 알 수 있다.

최근에 개발된 무인이동체의 경우 고장관리시스템을 기본적으로 탑재하고 있다. 일례로 현대에 개발된 항공기들은 기체 및 기계 구동부의 결합 여부에 대한 조기 진단을 위해 실시간 안전진단시스템(Health and Usage Monitoring System, HUMS) 장비를 갖추고 있다[4]. 하지만 무인이동체에는 고장에 민감한 다양한 하위시스템(Subsystem)이 탑재되어 있다. 또한 운용환경에 따라 예측하지 못한 사건이 발생할 수 있다. 이와 같은 이유로 기술의 발전에도 불구하고 고장 발생은 불가피하며 여전히 고장으로 인한 사고는 발생하고 있다. 이에 본 논문에서는 무인이동체 산업실태조사 결과를 기반으로 실제 산업현장에서 발생하는 고장 실태를 파악하여 산업계에서의 고장대응기술의 활용성에 대해 논하고자 한다.

무인이동체는 활용되는 환경에 따라 육상, 해양, 공중 무인이동체로 구분한다. 육상은 무인육상이동체(Unmanned Ground Vehicle, UGV)로, 해양은 무인선박(Unmanned Surface Vehicle, USV)으로, 공중은 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)로 정의 가능하다. 본 논문에서 시행한 국내 무인이동체 산업실태조사는 육해공 모든 무인이동체 업체를 대상으로 한다. 조사대상 업체 수는 공중 1,515개 곳, 육상 2개 곳, 해양 4개 곳으로 공중 무인이동체가 가장 많다. 특히 공중 무인이동체 중에서도 멀티콥터 활용 업체가 1,282개 곳으로 가장 많은 비중을 차지한다. 따라서 본 논문에서는 업체 수가 가장 많은 멀

티콥터 무인이동체의 고장사례를 기반으로 영향성 분석을 수행한다. 고장진단 및 대응 기술 연구사례는 모든 무인이동체를 대상으로 소개하며, 고장대응체계 또한 모든 무인이동체를 대상으로 제한한다.

전체 논문의 구조는 다음과 같다. II장에서는 국내 무인이동체 산업실태 설문조사 수행 결과를 기반으로 무인이동체 운용 시 고장 발생률이 높은 부품과 고장 발생 시 심각도가 높은 부품을 파악한다. 또한 조사를 통해 파악된 부품을 대상으로 고장 시뮬레이션을 수행하여 고장이 무인이동체의 거동에 미치는 영향에 대해 분석한다. III장에서는 현재 수행되고 있는 고장진단 및 고장대응 기법에 대한 연구사례를 살펴본다. 또한 이를 무인이동체에 적용하기 위한 방안과 연구 전망에 대해 분석한다. 이후 고장대응체계를 제시하고, 산업계에서 고장대응체계 설계 시 고려해야 할 사항에 대해 논한다. 마지막으로 IV장에서는 본 논문의 내용을 요약한다.

II. 무인이동체 고장 발생 시 영향

무인이동체를 운용함에 있어 고장은 빈번하게 발생한다. ‘2019 무인이동체산업 및 드론활용 실태조사 보고서’ 결과에 따르면 무인이동체 활용 매출액이 클수록, 드론 관련 인력 수가 많은 산업체일수록 무인이동체 고장 발생 경험 비율도 높아졌다[5]. 이는 규모가 큰 산업체일수록 무인이동체를 운용하는 목적이 다양하고 운용시간이 길고 이로 인해 고장이 발생하는 경우가 빈번하기 때문이다. Fig. 1은 무인이동체 운용 시 고장 발생 부품을 조사한 결과이다. Fig. 1을 통해 확인할 수 있듯 충돌 혹은 사용자의 운용 미흡 등의 문제로 프로펠러와 프레임에서 고장이 제일 많았다. 이어서 모터와 배터리 고장이 많이 발생한 것으로 조사되었다.

Figure 2는 고장 부품에 따라 무인이동체 운용에 있어 발생하는 심각도를 조사한 결과이다. 프로펠러와 프레임은 고장 발생이 많은 것에 비해 상대적으로 심각도는 높지 않는데 이는 헬스콥터나 옥타콥터와 같은 여유 조종력을 가진 무인이동체를 운용하는 경우가 많아져 모터 1, 2대가 고장이 나더라도 자세 회복 및 임무 지속이 가능하기 때문이다. 센서 고장의 경우 IMU(Inertial Measurement Unit)는 고장 발생 빈도는 낮지만, 고장 발생 시 운용에 심각한 문제가 발생함을 알 수 있다. 이는 배터리와 ESC도 동일하다.

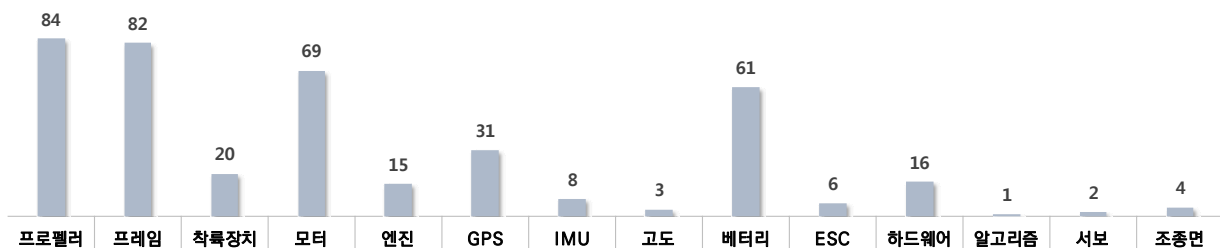


Fig. 1. Graph of investigation results that fault components for multicopter UAVs

[Base: 고장발생(n=268), 단위: %]

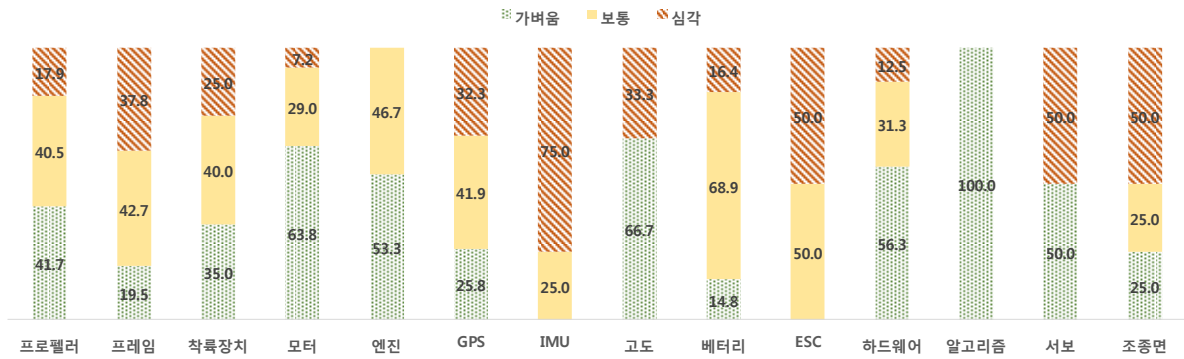
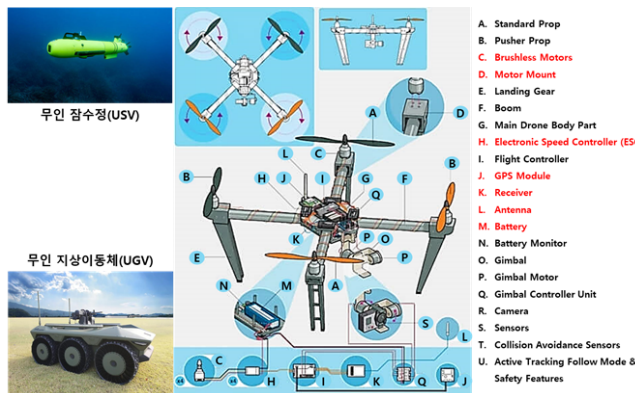


Fig. 2. The investigation results of multicopter UAVs fault severity level



고장 구분	부품 구성	고장 원인	발생 가능 고장
센서계 고장	①, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮, ⑯, ⑰, ⑱, ⑲, ⑳, ㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕, ㉖, ㉗, ㉘, ㉙, ㉚, ㉛, ㉜, ㉝, ㉞, ㉟, ㊱, ㊲, ㊳, ㊴, ㊵, ㊶, ㊷, ㊸, ㊹, ㊺, ㊻, ㊼, ㊽, ㊾, ㊿	환경적 요인 회로 손상	위치 및 자세 제어 불가
구동계 고장	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮, ⑯, ⑰, ⑱, ⑲, ⑳, ㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕, ㉖, ㉗, ㉘, ㉙, ㉚, ㉛, ㉜, ㉝, ㉞, ㉟, ㊱, ㊲, ㊳, ㊴, ㊵, ㊶, ㊷, ㊸, ㊹, ㊺, ㊻, ㊼, ㊽, ㊾, ㊿	모터 내부 합선 베어링 파손	모터 제어 불가 모터 성능 저하
통신계 고장	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮, ⑯, ⑰, ⑱, ⑲, ⑳, ㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕, ㉖, ㉗, ㉘, ㉙, ㉚, ㉛, ㉜, ㉝, ㉞, ㉟, ㊱, ㊲, ㊳, ㊴, ㊵, ㊶, ㊷, ㊸, ㊹, ㊺, ㊻, ㊼, ㊽, ㊾, ㊿	접촉 불량, 재밍 통신 거리	명령 인가 불가
기계/구조계 고장	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮, ⑯, ⑰, ⑱, ⑲, ⑳, ㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕, ㉖, ㉗, ㉘, ㉙, ㉚, ㉛, ㉜, ㉝, ㉞, ㉟, ㊱, ㊲, ㊳, ㊴, ㊵, ㊶, ㊷, ㊸, ㊹, ㊺, ㊻, ㊼, ㊽, ㊾, ㊿	충돌에 의한 파손 노후화	구조적 제약 발생 진동으로 인한 추력 손실
제어계 고장	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮, ⑯, ⑰, ⑱, ⑲, ⑳, ㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕, ㉖, ㉗, ㉘, ㉙, ㉚, ㉛, ㉜, ㉝, ㉞, ㉟, ㊱, ㊲, ㊳, ㊴, ㊵, ㊶, ㊷, ㊸, ㊹, ㊺, ㊻, ㊼, ㊽, ㊾, ㊿	S/W 오류, 회로 결함	제어 불가
전력계 고장	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮, ⑯, ⑰, ⑱, ⑲, ⑳, ㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕, ㉖, ㉗, ㉘, ㉙, ㉚, ㉛, ㉜, ㉝, ㉞, ㉟, ㊱, ㊲, ㊳, ㊴, ㊵, ㊶, ㊷, ㊸, ㊹, ㊺, ㊻, ㊼, ㊽, ㊾, ㊿	단선, 충돌에 의한 손상	합선, 추락 / 충돌

Fig. 3. The components of unmanned vehicles / Possible failures according to classification [6]

본 논문에서는 각 고장 계통에 따라 고장 경우를 정리하고 시뮬레이션을 통해 각각의 계통 고장 발생 시 발생하는 현상을 설명한다. Fig. 3은 무인이동체 부품별 고장을 분류한 그림이며 Table 1은 본 논문에서 고려할 고장 계통 분류(추진, 센서, 전력) 및 고장 심각 수준 조사 결과를 나타낸다. 실제 무인이동체에서는 Fig. 3과 같이 추진, 센서, 전력 계통 외에도 통신, 기계/구조, 제어(FCC, S/W 오류) 계통의 고장 가능성도 존재하지만, 본 논문에서는 설문조사 결과를 기반으로 추진, 센서, 전력 계통으로 특정한다.

Table 1. Fault severity level and frequency considered in this study

Faulty component		Fault severity level ¹⁾ (%)		
		Minor	Major	Hazardous
Propulsion	Propeller	41.7	40.5	17.9
	Motor	63.8	29.0	7.2
Sensor	GPS	25.8	41.9	32.3
	IMU	0.0	25.0	75.0
	Barometer	66.7	0.0	33.3
Power	Battery	14.8	68.9	16.4
	Power board	0.0	50.0	50.0

2.1 추진 계통

일반적인 무인이동체의 경우 소비전력의 대부분은 모터와 같은 추진 계통에 사용된다. 따라서 다른 부품들에 비해 작업 부하가 생기기 쉽고 진동이나 노후화로 인한 고장이 빈번하게 발생한다. 추진 계통 부품에 고장이 발생하게 되면 무인이동체는 제어력을 잃어 사고로 이어진다. 따라서 운용 중 발생 가능한 추진 계통 고장의 경우를 정의하여 고장 발생 시 빠르고 정확하게 판단함으로써 무인이동체 운용 시 안정성을 확보할 필요가 있다.

2.1.1 프로펠러 고장

프로펠러는 무인이동체에 추력을 제공하는 중요한 부품이다. 프로펠러에 발생하는 고장은 일반적으로 충돌로 인한 파손, 프로펠러 표면 손상 혹은 모터와 험하게 결합하여 제대로 회전이 되지 않는 경우가 있다.

프로펠러가 일정한 속도로 회전한다고 가정하면 프로펠러는 무인이동체에 일정한 추력을 제공한다. 하지만 운용 중에 프로펠러에 고장이 발생한다면 추력이 일정하게 유지되지 않고 운용 시 안정성과 조종성에 악영향을 미친다.

1) 가벼움 : 고장은 발생했지만 정상 운용에 문제없는 경우
보통 : 정상적으로 운용하기 위해서 조치를 취해야 하는 경우
심각 : 정상적으로 운용할 수 없는 경우

2.1.2 모터 고장

무인이동체 운용 시 모터의 구동 회로기관은 항상 부하가 심하게 발생하고 온도가 높아지며 이러한 이유로 인하여 다른 부품들보다 빠르게 노후화된다. 이는 고장률이 높아져 무인이동체를 운용함에 있어서 큰 위협이 된다. 일반적으로 모터는 단선 혹은 단락이 발생하거나 노이즈 발생, 모터의 위상이 변하는 등의 고장이 발생한다.

2.1.3 추력 계통 고장 시 현상

공중 무인이동체인 헬사콥터 기체를 대상으로 고장 시 물레이션을 수행하여 모터 고장 시 발생하는 현상에 대해 분석하였다. 기체의 모터 배치 및 좌표계는 Fig. 4에 나타내었다. 제자리 비행 중 3번 모터의 프로펠러가 탈락함으로써 추력을 잃게 되는 고장 상황을 가정하여 시물레이션을 수행하였다. (Fig. 4에 고장 위치 표기)

3번 모터 고장 시물레이션 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 각속도 반응을 보면 5초에 고장 발생 시, x축을 기준으로 음의 톨링 모멘트와 z축을 기준으로 반시계방향 회전이 급격히 발생함을 알 수 있다. 이에 대한 영향으로 기본적인 PID 제어가 수행되고 있음에도 불구하고 고장 발생 1.1초 만에 기체가 추락함을 확인할 수 있다. 이는 고장진단 및 대응체계를 적용하지 않은 채로 시물레이션을 수행하였기에 나타나는 현상이다. 만일 고장진단 모듈과 간단한 고장대응체계만 갖췄더라면 비행을 지속

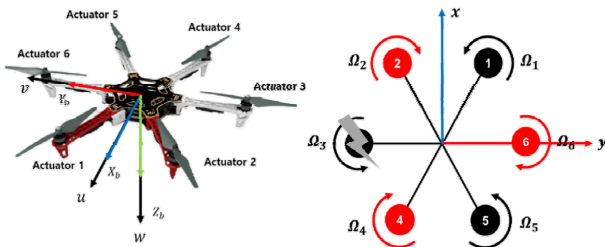


Fig. 4. The motor arrangement and coordinate system of the hexacopter UAV

할 수 있었을 것이다. 즉, 고장진단 모듈을 통해 모터 고장 정보를 얻은 후 고장난 모터(3번)와 대칭위치에 있는 모터(6번)를 모두 꺼버리는 전략만 사용하더라도 제자리 비행 임무를 수행하는 데에는 문제가 없었을 것이다. 물론 이 전략을 취하면 전체 추력 저하로 인하여 약간의 고도 저하는 발생할 수 있다.

2.2 센서 계통

무인이동체 운용에 있어 센서 자체의 신뢰성은 무엇보다도 중요한 요소이다. 특히 무인이동체에서 센서의 고장으로 인한 오동작은 전체 시스템의 안정성을 해칠 수 있다. 센서 계통의 부품은 GPS와 같이 이동체 표면에 위치하거나 관성측정장치(IMU)와 같이 외부적 요인에 민감한 부품이 많아 충격과 진동에 영향을 많이 받는다. 또한 센서의 노화나 전자기파로 인한 잡음, 온/습도로 인한 오동작 등으로 인해 고장 발생의 가능성이 존재한다. 이러한 센서 고장을 방지하기 위해 다중화 운용을 하거나 센서융합을 통해 항법 성능을 보조하는 방안이 있다 [7]. 센서의 고장 유형은 일반적으로 8가지로 나뉜다 [8]. Table 2에 센서 고장 유형을 정의하였다.

Table 2. Sensor fault cases

Fault type	Definition
Hard over	Sensor output error exceeding threshold
Bias	Sensor output with constant error
Spike	Drastically increasing and then return
Stuck	Missing or non-updating sensor output
Erratic	Increasing noise
Cyclic	Increasing noise with certain pattern
Drift	Gradual decline of sensor output
Nonlinear	Unpredictable variation of sensor output

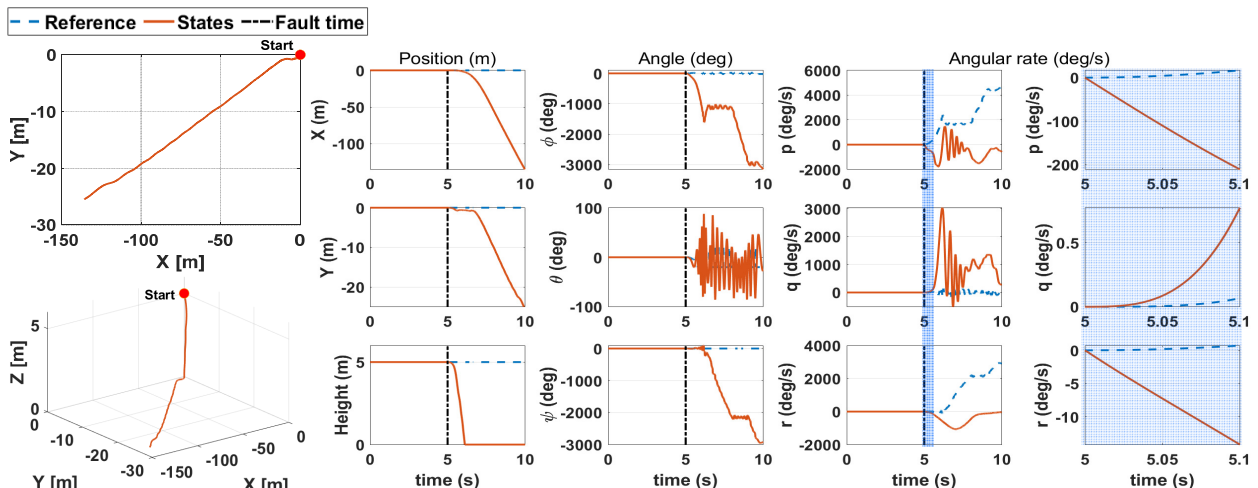


Fig. 5. Motor fault simulation results

2.2.1 GPS, 고도계 고장

무인이동체의 제어 및 항법기술이 발달함에 따라 임무 운용에 있어 GPS와 고도계의 중요도는 높아졌다. 이는 역설적으로 고장 발생 시 무인이동체의 제어 및 항법에 심각한 성능 저하를 야기함을 의미한다. GPS에 발생하는 고장은 도심 환경 등에서 위성 정보를 받지 못하여 Stuck이 발생하는 경우 혹은 전자기 계통 부품으로 인해 생기는 잡음으로 인해 Drift 되거나 Bias 되는 경우들이 있다.

2.2.2 관성측정장치(IMU) 고장

GPS나 고도계의 경우 자동 항법 운용에 활용되기에 고장 발생 시 수동 조종 등을 통해 임무 운용을 지속하거나 복귀시킬 수 있다. 그러나 관성 측정 장치의 경우 비행체의 자세제어에 필수적인 센서로 사용되기에 무인이동체 제어에 있어 센서의 신뢰성이 매우 중요하며 고장이 발생한다면 임무 지속에 있어 매우 심각한 상황으로 이어진다.

관성 측정 장치에 일반적으로 가속도 센서, 자이로스코프 그리고 지자기 센서로 구성되어 매우 빠른 주파수로 측정한다. 관성 측정 장치의 경우 고장이 발생하면 대체할 센서가 없어 일반적으로 여러 대를 탑재하여 다중화 구성을 한 뒤 고장이 발생하면 분리하는 방법을 주로 사용하고 있다.

2.2.3 센서 계통 고장 시 현상

Figure 1과 Table 1을 통해 GPS는 고장률이 가장 높은 센서에 해당하고, 관성측정장치는 고장률은 상대적으로 낮지만 고장 심각 수준이 높은 센서임을 알 수 있다. 또한 GPS와 관성측정장치는 무인이동체의 항법과 자세 제어에 있어 필수적인 센서이다. 이에 따라 GPS와 관성측정장치를 대상으로 고장 시뮬레이션을 수행하였다. 고장 유형은 두 가지 센서 모두 Bias와 Drift 고장을 고려하였다. Table 3과 4에 GPS와 관성측정장치의 구체적인

Table 3. GPS fault scenario

GPS	Fault type	Magnitude	Time	Unit
X, Y	Bias	10	t > 0s	m
Z	Bias	5		
U, V, W	Drift	0.01(t-5)	t > 5s	m/s

Table 4. IMU fault scenario

IMU	Fault type	Magnitude	Time	Unit
p	Bias	5	t > 5s	deg/s
q	Drift	0.5(t-15)	t > 15s	deg/s
r	Bias	5	t > 5s	deg/s

고장 시나리오를 각각 정리하였다. Fig. 4의 헬스콥터를 대상으로 사각 경로 비행 임무 수행 중 센서에 고장이 발생했다고 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Figs. 6과 7에 GPS와 관성 측정 장치의 고장 시뮬레이션 결과를 각각 나타내었다.

Figure 6의 결과를 보면 초반부에 Bias 고장으로 인해 경로 오차가 발생하지만 고도는 고장 이후 1.5초 안에, X와 Y 위치는 고장 이후 10초 안에 제어기에 의해 그 오차가 상쇄됨을 확인할 수 있다. 또한 GPS 고장의 경우 임무 대부분의 시간 동안 Drift 고장이 인가되었지만 고도 오차는 발생하지 않았으며 X, Y 위치는 최대 2m 정도의 오차를 보이고 있다.

Figure 7의 결과를 통해 관성측정장치의 경우 Bias 고장인가와 동시에 경로 추종 오차가 2m 발생함을 알 수 있다. 이후 q에 Drift 고장이 인가되었을 땐 Drift 고장으로 인해 오차가 누적되어 양의 x축 방향으로 경로를 완전히 이탈함을 알 수 있다. 또한 관성측정장치는 고장이 발생하면 기체의 자세와 위치 측면에서 모두 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

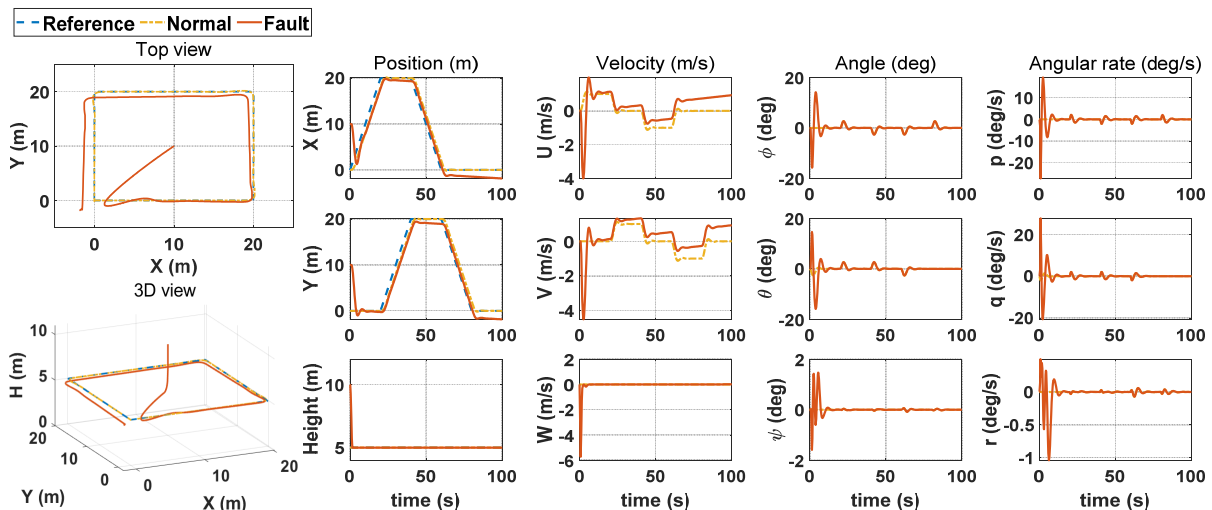


Fig. 6. GPS fault simulation results

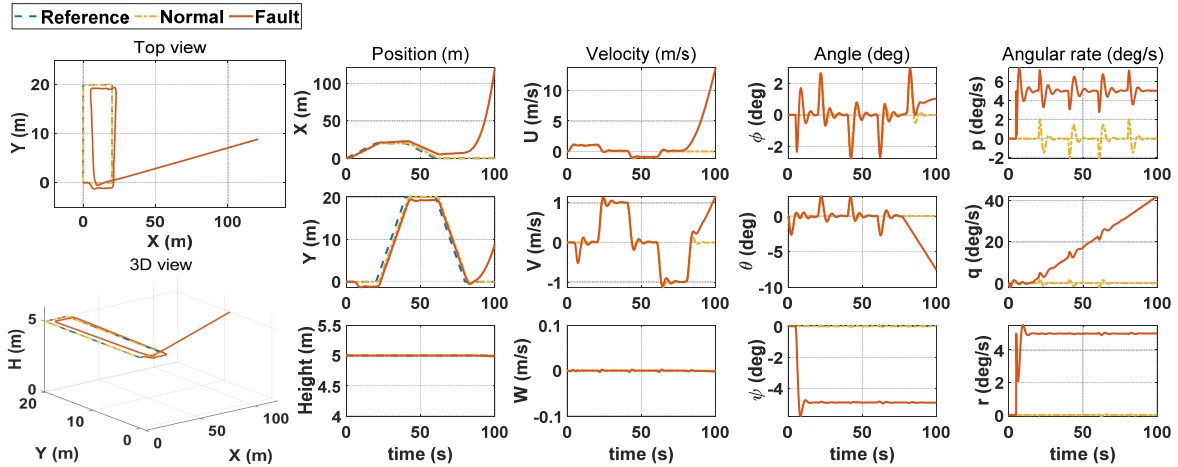


Fig. 7. IMU fault simulation results

시뮬레이션을 통해 GPS 고장의 경우는 경로 추종 임무를 수행하는 데 있어 약간의 추종 성능 저하를 유발하지만 경로를 이탈할 정도로 심각하진 않음을 알 수 있다. 이에 비해 관성측정장치의 경우는 고장이 발생하면 추종 오차가 즉각적으로 유발되고, 고장으로 인해 오차가 누적되면 임무 경로를 크게 이탈하여 임무를 완수하지 못함을 확인할 수 있다.

본 논문에서 수행한 센서 고장시뮬레이션은 다중화 시스템을 갖추지 않았을 때의 결과이다. 하지만 일반적으로 고장 심각도가 높은 관성측정장치는 3중화를 기본으로 한다. 이에 센서 고장이 발생하여도 건강한 센서로 대체하여 임무지속시간을 늘릴 수 있으며, 경로 추종 오차 또한 정상일 때의 수준을 유지할 수 있게 된다.

2.3 전력 계통

무인이동체의 운용은 주로 전력을 사용하여 동작하고 있어 전력 계통의 고장 발생은 임무 지속에 있어 치명적이며 심한 경우 복구가 불가능한 상황이 발생할 수 있

다. 전력 계통은 크게 배터리와 전원보드로 나눌 수 있으며 고장 경우에 따라 심각성에 차이가 있다. Table 5는 무인이동체용으로 가장 많이 사용되는 Li-Po 배터리로 가정하여 발생 가능한 전력 계통 주요 고장 경우 및 요인을 정리하였다[9].

III. 고장대응 기술현황 및 활용방안 논의

무인이동체 운용 시 앞 절에서 분석한 형태의 실제 고장이 발생했을 때 즉각적으로 대응하지 않는다면 경우에 따라 심각한 인명/재산 등의 피해가 발생한다. 이에 대응하기 위해서는 고장이 발생한 부분에 대한 감지 및 진단이 필요하고, 필요하다면 고장 허용제어가 수행되어야 한다.

3.1 고장진단 기법의 기술현황

고장진단 기법은 방법에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 고장 메커니즘을 파악한 후 수학적 고장 물리 모델을 이용하여 정상 혹은 고장 상태를 파악하는 모델기반 진단 기법과 주기적인 모니터링을 통해 고장 요소들을 수집한 후, 머신러닝 등의 데이터 처리 기법을 활용하여 고장 상태를 파악하는 데이터 기반 진단 기법으로 분류할 수 있다[10]. Fig. 8에 본 논문에서 살펴볼 고장진단 기법을 도식화하여 나타내었다.

Table 5. Fault cases of the power system

Part	Fault case	Fault factor
Battery	Temporary loss of capacity	Power consumption due to storage/operation
	Permanent loss of capacity	Changes in battery internal resistance due to charging/discharging
	Thermal environment	Malfunction and explosion due to battery overheating
	Shock during operation	Rapid battery overheating & Internal electrolyte leakage
	Failure of cell balancing	Voltage imbalance between battery cells
Power board	Fatigue failure of joints	Accumulation of fatigue due to vibration, shock, etc.
	Power control error	Control circuit signal error

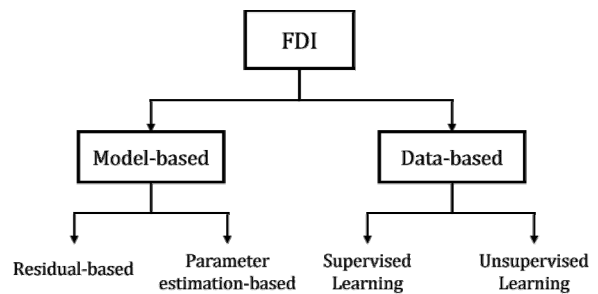


Fig. 8. Classification of the FDI (Fault Detection and Isolation) approaches

3.1.1 모델기반 진단 기법

모델기반 진단 기법은 고장 요인과 연관된 수학적 고장 물리모델을 정의하고 관련된 고장진단 요소의 실시간 모니터링을 통해 모델을 업데이트해서 고장진단 대상의 정상 혹은 고장을 판단하는 기법이다.

일반적으로 예측값과 실시간으로 획득되는 센서 데이터 차이를 통계적으로 정의된 임계값(Threshold)과 비교하여 고장진단을 수행하는 잔차 기반 고장감지 기법과 매개변수 추정하거나 시스템 모델링을 통해 진단하는 방법으로 활용한다.

잔차 기반 고장감지 기법은 무인이동체에서 구동기 및 센서 고장감지에 많이 사용된다. 잔차 기반 고장감지 기법은 알고리즘 자체가 간단하여 보편적으로 활용할 수 있고 감지 결과가 매우 빠르게 출력된다는 장점이 있다. 하지만 고장 정도를 파악할 수 없다는 단점이 존재한다. 잔차 기반 고장감지 기법으로는 필터 기반 진단 기법이 대표적이다. 충남대학교에서는 헬사콥터의 대칭성 및 확장 칼만 필터를 이용한 구동기 고장진단 및 대응 기법에 대해 연구를 수행하였다[11]. 확장 칼만 필터를 이용해 각 구동기의 효율계수를 실시간으로 추정하고 헬사콥터의 대칭성을 이용해 잔차 기반 고장감지 기법에 적용하였다. 이후 효율계수와 잔차 기반 고장감지 기법을 활용하여 구동기 고장 상태를 진단 및 분리를 수행하는 고장 대응 기법을 확립하였다.

매개변수를 추정하거나 시스템 모델링을 통해 진단하는 방법은 고장 정도를 파악할 수 있어 잔차 기반 고장감지 기법에 비해 얻을 수 있는 고장 관련 데이터가 다양하고 세부적이다. 하지만 고장진단 대상의 모델이 복잡한 경우 구성하기 어렵다는 단점이 존재한다. 미국 일리노이대학교와 독일 다름슈타트 공과대학교에서는 H^∞ 매개변수 식별 알고리즘을 이용하여 난기류 환경에서 정상 수평 비행하는 항공기에서 발생하는 결빙을 감지하는 연구를 수행하였다[12].

3.1.2 데이터 기반 진단 기법

데이터 기반 진단 기법은 고장진단 대상의 고장 요인 데이터를 수집할 때 대상의 상태 정보를 아는 경우와 모르는 경우에 따라 방법이 나뉜다. 진단 대상의 상태 정보를 아는 경우는 사전에 데이터를 분류하여 지도학습 기반으로 고장진단을 수행하게 된다. 상태 정보를 모르는 경우 일반적으로 비지도학습 기반 데이터 군집화를 통한 고장진단을 수행한다.

상태 정보를 아는 지도학습의 방법으로는 대표적으로 Support Vector Machine(SVM)과 인공신경망이 있다. SVM은 두 카테고리 중 어느 하나에 속한 데이터의 집합이 주어졌을 때 주어진 데이터 집합을 바탕으로 하여 새로운 데이터가 어느 카테고리에 속할지 판단하는 비확률적 이진 선형 분류 모델 생성기법이다[13]. 즉 SVM은 사전에 정상과 고장에 대한 학습을 수행하고 이를 기반으로 이진 분류를 위한 기준인 초평면(hyperplane)을

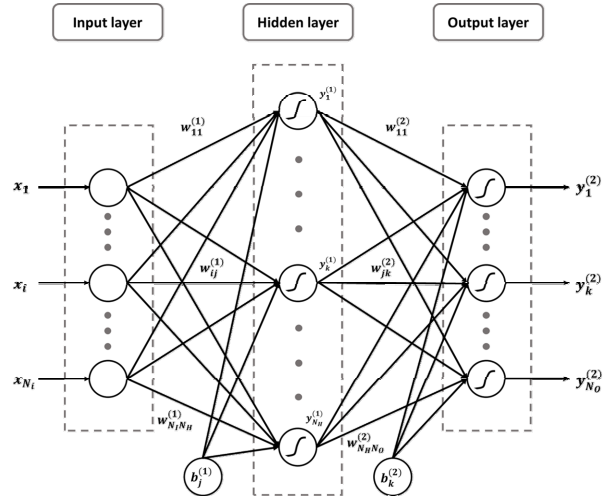


Fig. 9. Typical structure of ANN algorithm

정의한다. 중국 베이징대학교에서는 모델기반 SVM 알고리즘을 이용하여 자율주행차량 조향장치의 고장진단을 수행하였다[14]. 학습데이터인 잔차를 생성하기 위해 시스템 모델을 사용하였다. 또한 데이터 기반 기법의 성능 저하를 유발하는 데이터 불균형 현상을 해결하기 위해 선형판별분석(Linear discriminant analysis) 기반의 언더샘플링 방법을 활용하여 균형적인 데이터 집단을 획득하였다. 나아가 왜곡된 분류 결과 도출을 방지하고자 결정 경계(Decision boundary) 최적화를 수행해 임계값을 조정하였다.

인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)은 뇌의 구조에서 영감을 받은 방식으로 경험을 통해 자동으로 지식을 얻을 수 있는 일종의 수학적 모델을 설명하는 데 사용되는 방법이다[15]. 인공신경망은 입력 계층, 하나 이상의 은닉 계층 및 출력 계층의 피드포워드 구조로 구성된다. 인공신경망은 연결된 병렬 및 분산 프로세서를 사용하여 구축된다. Fig. 9는 단일 은닉층이 있는 인공신경망의 일반적인 구조를 나타낸다.

상태 정보를 모르는 비지도학습은 데이터로부터 진단 대상의 상태 정보를 구분하기 위해 취득한 데이터를 군집화하는 클러스터링 기법을 사용한다. 클러스터링 기법은 데이터를 군집화하는 과정에서 어떻게 할당하느냐에 따라 하드 클러스터링 기법과 소프트 클러스터링 기법으로 나뉜다. 하드 클러스터링 기법은 하나의 데이터를 하나의 군집에 할당하는 기법이며 대표적으로 K-means 클러스터링 알고리즘이 있다. K-means 클러스터링 알고리즘은 n 개의 d -차원 데이터(x_1, x_2, \dots, x_n) 집합이 주어졌을 때, n 개의 데이터를 각 군집 내에서 응집도를 최대로 하는 K 개의 군집 S 로 분할한다. 즉 각 군집 내의 중심과 군집 내의 데이터 간의 거리를 최소화 하는 집합을 찾는 기법이다[16]. 호서대학교에서는 K-means 알고리즘과 CNN 알고리즘을 적용하여 비지도학습과 지도학습의 단점들을 보완한 기법을 제시하여 사용자가 고려하지 못한 데이터가 입력되어도 높은 정확도로 전동기 고장진단을 수행하였다[17].

소프트 클러스터링 기법은 하나의 데이터가 다수의 군집에 할당되는 기법이며 대표적으로 Fuzzy C-means (FCM) 클러스터링 알고리즘이 있다. FCM 클러스터링 알고리즘은 Fuzzy logic에 따라 각 데이터가 하나의 군집에 속하지 않고 여러 군집에 속할 수 있고 이를 각 군집에 속할 가능성(possibility) 및 확률(probability)로 제시한다. 중국 시안대학교에서는 진동 영상자료를 이미지화한 데이터를 이용하여 FCM 클러스터링 알고리즘을 기반으로 베어링의 결함 진단 기법을 연구하였다[18].

3.1.3 고장진단 기법의 적용방안 및 전망

II장의 고장 시뮬레이션 결과와 고장진단 기법 연구사례를 기반으로 고장진단 기법을 실제 무인기동체의 구동기 및 센서 고장에 적용 시 고려해야 하는 사항과 연구전망에 대해 제시하고자 한다. 자세히 살펴보기에 앞서 Table 6에 구동기 및 센서 고장진단 모듈 설계 시 주요 고려사항에 대해 정리하였다.

Figure 5의 모터(구동기) 고장 시뮬레이션 결과를 통해, 구동기에서 고장이 발생하면 3축 각속도에 즉각적인 변화가 생긴다는 것을 알 수 있다. 또한 구동기 고장 시 나타나는 각속도 변화량의 부호를 통해 고장난 구동기의 위치를 물리적으로 예측해 볼 수 있다. 이는 물리적인 현상을 이용하면 구동기 고장감지는 물론이고, 고장난 구동기의 위치까지 파악 가능함을 의미한다. 따라서 구동기 고장의 경우 고장 발생 시 나타나는 물리적인 현상을 고장진단에 활용하면 구동기 위치별 고장 여부를 확인하는데 효과적일 것이다.

구동기의 경우 고장 여부와 고장 위치 파악 외에도 고장 정도를 진단하는 것이 실제 산업현장에서 임무수행 가능성을 판단하는 데 매우 중요하다. 이에 따라 실제 산업현장에서는 RPM 센서와 같은 구동기 상태 정보를 측정할 수 있는 별도의 센서가 필요할 수 있다. 또한 구동기 상태를 예측하여 구동기 효율 정도를 파악할 수 있는 알고리즘의 개발이 요구된다.

센서 고장은 고장률과 심각도를 고려하여 GPS와 관성측정장치의 고장을 고려하였다. 먼저 GPS의 경우 시뮬레이션을 통해 Bias와 Drift 고장으로 인해 2m 정도의 위

치 오차가 유발됨을 확인하였다. 2m 크기의 오차는 건물 밀집도가 낮은 지역에서는 크다고 볼 수 없지만 밀집도가 높은 도심지에서 운용하게 되면 지형지물과의 충돌을 유발할 수 있다. 관성측정장치의 경우는 고장이 발생하면 제어기를 통해선 회복하기 어렵다는 것을 확인하였다.

이처럼 센서는 자세제어 및 위치제어에 필수적인 부품이므로 고장을 빠르게 감지하여 건강한 센서로 대체하는 것이 중요하다. 이외에도 실제 현장에서는 외란과 고장을 분리하여 고장만 감지하는 기법이 필요하다. 센서 측정값은 고장으로 인해 오차가 발생할 수도 있지만 바람이나 운용체의 진동과 같은 외란에 의해서도 오차가 발생할 수 있으므로 외란과 고장을 분리하여 감지하는 것도 중요하다. 따라서 센서 고장진단에 있어 빠른 고장감지, 하드웨어 다중화, 고장과 외란을 구분할 수 있는 고장진단 알고리즘의 개발이 필수적이다. 센서 다중화는 3중화를 기본으로 하며, GPS는 수신기를 다중화한다. GPS 고장은 수신기나 주변 지형지물 등으로 인한 GPS 신호 약화 혹은 신호 차단이 원인이기 때문이다[19].

현재 진행되고 있는 모델기반과 데이터 기반 진단 기법 관련 연구는 각각 한계점이 존재한다. 먼저 모델기반 진단기법 중 널리 연구되고 있는 잔차 기반 고장진단 기법은 고장여부는 진단이 가능하지만 고장 정도를 파악하는 데 한계가 있다. 또한 설계자가 상황에 따라 잔차 임계값 적절히 설정해줘야 정확한 고장진단이 가능하다는 문제가 있다. 데이터 기반 진단 기법은 우선 실제 산업현장에서 고장데이터를 확보하기가 어려워 학습데이터 간의 불균형 문제가 발생한다. 설사 데이터를 확보한다 해도 고장과 정상 표식을 명확하게 붙이기 어려운 경우가 많다. 이에 최근에는 정상데이터만을 이용하여 학습해 비정상 상태를 구분해내는 준지도학습(Semi-supervised learning)기법을 이용한 연구가 수행되고 있다. 하지만 데이터 기반 기법은 실제 산업현장에 적용될 시 안전성이나 성능에 대해서 확실히 검증가능한 부분이 없다는 점이 큰 문제이다.

이에 따라 최근에는 모델기반과 데이터 기반 기법의 단점을 상호 보완하기 위해 Fig. 10과 같이 두 기법을 융합한 형태의 진단 기법에 대한 연구가 이뤄지고 있다. 이처럼 실제 산업현장에서 쓰이기 위해서는 진단 성능에 영향을 주는 임계값 설정 부담은 줄이고, 성능을 물리적으로 분석 가능하도록 하는 융합 고장진단 기법에 대한 연구가 필요하다.

Table 6. Key considerations for FDI design

FDI	Considerations
Actuator FDI	Fault detection and diagnosis (determine fault or not and identify where the fault is)
	Diagnosis the degree of fault (by using health measurement sensor or actuator state estimation algorithm etc.)
Sensor FDI	Fast fault detection
	Hardware redundancy
	Algorithm to distinguish between fault and disturbance

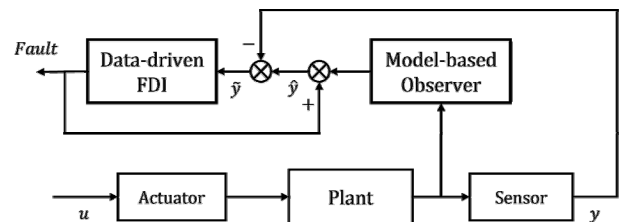


Fig. 10. Combined FDI system example

Table 7. Comparison between Active FTC and Passive FTC [20]

Property	Active FTC	Passive FTC
Architecture	Complex	Simple
Time response	Slow	Fast
Fault detection	Online /Real Time	Offline
Computations	Large	Relatively small
FDI	Essential	Not required
Controller reconfiguration	Required	Not required
Time delay	Possible (due to noise)	No
Fault case	Various	Fixed (predefined faults)
Control structure	Variable	Fixed

3.2 고장 허용제어의 기술현황

고장 상태가 진단되었다면 고장에 대응하기 위해 고장 허용제어(Fault Tolerant Control, FTC)를 수행한다. 고장 허용제어는 고장 발생 시 임무 지속 가능성을 높이거나 안전하게 착륙할 수 있도록 대처하는 제어 전략과 관련되어 있다. 일반적으로 고장 검출 분리(Fault Detection and Isolation, FDI) 모듈 사용 여부에 따라 수동적 고장 허용제어(Passive FTC)와 능동적 고장 허용제어(Active FTC)로 나눌 수 있다. Table 7에 수동적 고장 허용제어와 능동적 고장 허용제어를 비교하여 나타내었다[20].

3.2.1 수동적 고장 허용제어(Passive FTC) 현황

수동적 고장 허용제어는 고장 검출 분리 모듈 사용에 상관없이 강건하게 제어하기 때문에 구조가 단순하며 고장에 대한 대응이 빠르다는 장점이 있다. 하지만 다양한 고장에 대응하기 어려워 고장대응 유연성이 떨어진다. 대부분의 강건 제어 기법이 수동적 고장 허용제어에 해당한다. 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control, SMC) 기법, H_{∞} 제어 기법, 선형이차(Linear Quadratic) 제어 기법, 퍼지 로직 제어 기법, 르야프노프(Lyapunov) 기반 제어 기법 등이 이에 해당한다[21]. 이 중 슬라이딩 모드 제어 기법이 가장 널리 쓰이고 있다[20].

프랑스 엑스마르세유대학교에서는 SMC 기법을 기반으로 수동적 고장허용 제어 시스템을 제안하여 쿼드콥터의 구동기 고장에 활용한 연구를 수행하였다[22]. 이 연구에서는 고장에 빠르게 대응할 수 있도록 이중 제어 구조의 SMC를 제안하였다. 나선 경로 추종 시뮬레이션을 통해 제안된 기법이 내부 루프에서 빠르게 고장에 대응함으로써 일반적인 SMC보다 더 심한 고장에도 대응할 수 있음을 확인하였다.

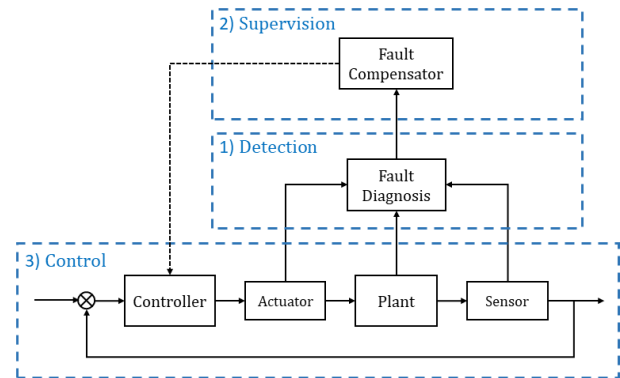


Fig. 11. General Structure of active FTC system

3.2.2 능동적 고장 허용제어(Active FTC) 현황

능동적 고장 허용제어는 고장 검출 분리 모듈에서 계산되는 결과를 바탕으로 재구성하여 대응하는 기법으로 고장 감지(detection), 고장 관리(Supervision), 제어(Control) 순서로 진행된다. 능동적 고장 허용제어는 다양한 고장에 대한 대응이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 모듈에서 계산되는 결과를 바탕으로 제어를 재구성하기에 수동적 고장 허용제어보다 상대적으로 대응 반응이 느리며 동시다발적인 고장에 반응이 어렵다는 단점이 존재한다. 일반적인 능동적 고장 허용제어 시스템의 구조는 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다[21].

중국 산동과학기술대학교에서는 센서 고장 및 다수의 불확실성에 영향을 받는 무인 잠수정의 경로 추종을 위해 능동적 고장허용 제어 체계에 대한 연구를 수행하였다[23]. 무인 잠수정은 불확실성이 큰 수중 환경에서 운용되므로, 이를 고려하고자 선형 속도 및 각속도 값을 사용할 수 없다고 가정하였다. FDI 모듈에서 센서 고장이 감지되면 FTC 모듈에서 고장이 발생한 센서의 실제 출력값을 상한 및 하한의 선형 조합으로 표현하고, 적응 법칙을 적용해 선형 매개변수를 조정하도록 설계하였다.

3.2.3 고장 허용제어의 적용방안 및 전망

수동적 고장허용 제어는 모든 고장 시나리오를 사전에 고려한 강건제어 형태이므로 고장 시나리오별로 최적의 성능을 낼 수 없으며, 정상일 때도 제어기의 수렴속도가 느려진다는 문제가 있다. 이러한 수동적 고장허용 제어의 한계를 해결하고자 능동적 고장허용 제어 기법에 대한 연구가 증가하고 있다. 나아가 수동적 고장허용 제어 기법과 능동적 고장허용 제어 기법을 모두 사용하는 고장 허용제어 시스템에 대한 연구도 수행되고 있다. FDI 모듈을 통해 고장 정보가 들어오기 전까지는 수동적 고장허용 제어 시스템을 이용해 제어를 수행하고, 고장 정보가 들어오면 능동적 고장허용 제어 시스템을 통해 제어가 수행되는 구조이다.

무인이동체의 실제 운용환경을 살펴보면 고장 외에도 외란이 존재하므로 위와 같은 수동적 고장허용 제어와 능동적 고장허용 제어를 통합한 고장허용 제어시스템이

필요하다. 일례로 무인항공기의 경우는 바람에 의한 외란이, 무인지상차량의 경우는 굴곡진 지면으로 인한 외란이 존재한다. 따라서 고장과 외란에 모두 대응하기 위해서는 외란에 강건한 수동적 고장허용 제어를 기본적으로 수행하면서, 고장 정보가 들어오면 다양한 고장에 대응할 수 있는 능동적 고장허용 제어를 수행하는 방향으로 연구가 진행되어야 할 것이다.

3.3 고장대응체계 제시 및 산업계 활용전망

고장진단 및 고장허용제어 기법은 일반적으로 하나로 통합 운용되어 고장 대응체계로서 구성하여 운용한다. 최근에는 산업계 다양한 분야에서 이러한 고장대응체계를 운용하는 추세이다[24]. 하지만 고장대응체계를 산업적인 측면에 바로 적용하기에는 해결해야 하는 문제가 존재한다. 고장진단의 경우 앞서 살펴본 대로 현재까지 연구가 수행된 모델기반 진단 기법과 데이터 기반 진단 기법에는 모두 한계점이 존재한다. 따라서 두 기법의 한계점을 상호 보완할 수 있는 융합 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

더 나아가 고장대응체계를 운용하기 위해서는 정확한 고장진단 및 고장 경우에 따른 유기적인 고장허용제어가 필요하다. 따라서 향후 실제 운용을 고려하여 통합 고장대응체계를 구성할 필요가 있다. Fig. 12는 고장진단 및 고장허용제어 기법들의 장단점을 고려한 통합 고장대응 체계에 대한 예시이다. 데이터 기반 고장진단 기법을 적용하여 실제 모델의 고장 판별을 위한 임계값을 설정하고 잔차를 계산한다면 정확하면서도 물리적 분석이 가능한 진단 기법을 구축할 수 있을 것이다. 진단한 고장 정보를 이용하여 수동적 고장 허용제어 및 능동적 고장 허용제어를 운용한다면 고장 정도와 종류에 상관없이 대응 가능한 고장대응체계를 구축할 수 있을 것이다.

산업현장에서는 고장진단 후 임무수행 가능 정도를 판단하는 것도 중요하다. 최근 무인이동체가 다양한 임무 목적에 따라 맞춤형으로 개발이 이뤄지고 있다는 점을 고려하면 건전성 진단 후 임무수행 가능 정도를 판단하는 것은 더욱 중요하다는 것을 알 수 있다. 이에 본 논문에서는 임무수행을 위한 건전성 단계를 Table 8과 같이 정의하여 제안하고자 한다. 고장 수준은 5단계로 구분하였으며, 각 단계에 해당하는 고장 사례를 제시하였다.

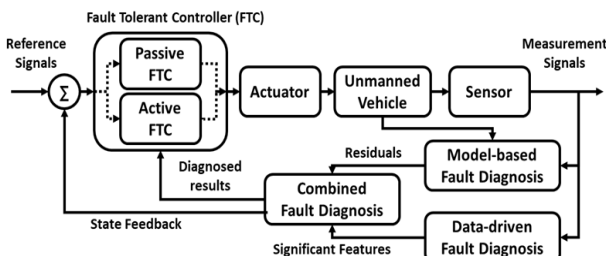


Fig. 12. Fault tolerant system diagram example

Table 8. Definition of health level for mission

Health Level	Definition	Fault Example
Level 5 (Best)	Normal (Fault free)	-
Level 4 (Good)	Mission capable (Limited maneuverability)	Breakage of multiplexed parts
Level 3 (Normal)	Limited mission capable	Some axis out of control
Level 2 (Warning)	Recommendation of mission stop	Communication failure
Level 1 (Bad)	Operation impossible	Engine damage

Table 8의 건전성 단계는 동일한 고장이라도 다중화 정도에 따라 완료할 수 있는 임무의 종류가 달라진다는 점을 고려하여 정의하였다. 예를 들어 멀티콥터의 모터 1개 고장 상황을 생각해 보면 동일한 고장이라도 헬사콥터인지, 쿼드콥터인지에 따라 임무수행 가능 정도가 달라진다. 먼저 헬사콥터의 경우 모터 1개가 고장나면 대칭인 모터를 끄는 전략을 취해 쿼드콥터 형태로 임무를 완료할 수 있다. 다만 전체적으로 가용한 제어력이 줄기 때문에 기동에 제한이 생길 것이다. 반면에 쿼드콥터는 모터 1개가 고장나면 yaw축 제어력을 완전히 잃기 때문에 제자리비행과 같은 제한적인 임무만 가능하게 된다. 또한 다중화가 불가하지만 단시간에 추락으로까지 이어지지 않는 고장의 경우에는 임무를 중지하는 게 권장되며, 다중화도 불가한데 고장 시 추락으로 이어지는 심각한 고장의 경우에는 운용이 불가하게 된다.

이외에도 부품별 다중화 정도와 여부에 따라 대응전략이 달라진다는 점을 고려하여 다중화가 가능한 부품은 부품 단계에서 대응하고, 다중화가 불가한 부분은 시스템 단계에서 분류하도록 하는 고장대응체계도 필요할 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 국내 무인이동체 산업실태 설문조사를 수행하여 추진 계통, 센서 계통, 전력 계통 고장에 대한 연구가 필요함을 확인하였다. 추진 계통은 고장 발생률이 높은 계통에 해당하며, 센서 계통은 고장 심각도가 높은 계통에 해당한다. 전력 계통은 고장 발생률과 심각도가 모두 높은 계통에 해당함을 확인하였다. 또한 위 3가지 계통의 고장 종류와 원인에 대해 살펴보았다. 이 중 추진 계통과 센서 계통 고장에 대해서는 헬사콥터를 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 고장 발생 시 나타나는 기체의 반응에 대해 분석하였다.

이후 고장진단 및 고장대응 기법에 대한 연구사례를 살펴보았다. 고장 시뮬레이션 결과와 연구사례를 기반으로 무인이동체의 구동기 및 센서 고장에 적용 시 중요한

요인에 대해 논의하였다. 또한 현재까지 제안된 고장진단 및 고장대응기술의 한계점을 살펴보고 통합 고장대응기술 체계를 제시하였다. 고장대응기술 체계 설계와 더불어 산업계에 고장대응기술 개발에 있어 추가적으로 고려해야 할 요인에 대해 논의하였다.

앞으로 무인이동체가 자율화됨에 따라 고장진단 및 대응기술에 대한 요구도 또한 함께 증가하게 될 것이므로 무인이동체 발전에 발맞춰 고장대응기술에 대한 연구도 지속적으로 이뤄져야 할 필요가 있다. 이와 더불어 산업계에서 적용할 수 있는 실질적인 통합 체계에 대한 연구도 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인이동체원천기술개발사업을 통해 수행되었음(2020M3C1C1A01083162)

References

- 1) Kang, W. G., Jung, Y. W. and Hwang, I. S., "Key Technologies for Autonomous Unmanned Vehicles: Trends and Future Plans for Future Unmanned Vehicles such as Drones and Autonomous Vehicles," *KICS Information and Communication Magazine Open Lecture Series*, Vol. 35, No. 1, 2018, pp. 28~35.
- 2) Kim, Y. S. and Bae, J. W., "Small UAV Failure Rate Analysis Based on Human Damage on the Ground Considering Flight Over Populated Area," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 9, 2021, pp. 781~789.
- 3) Nam, H. S., Park, B. S. and Lee, H. T., "Research on the Crash Location and Speed Distribution of Low Altitude Fixed-Wing Aircraft," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 50, No. 1, 2022, pp. 59~66.
- 4) Jeong, S. G., Seo, Y. J., Kim, Y. M. and Jun, B. K., "A Study on the Feasibility of Defect Diagnosis using Principal Component Analysis on Aircraft Vibration Data," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 46, No. 9, 2018, pp. 767~773.
- 5) KRUAU, "2019 Survey Report on Unmanned Vehicle Industry and Drone Application," 2020, pp. 74~104.
- 6) YÜZGEÇ, U., ÖKTEN, İ., ÜÇGÜN, H., GÜN, A. R., TÜRKYILMAZ, T., KESLER, M., KARAKUZU, C. and UÇAR, G., "Development of the Test Platform for Rotary Wing Unmanned Air Vehicle," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri*, Vol. 3, No. 2, 2016, pp. 18~24.
- 7) Kim, T. G., Kim, D. M., Kim, S. K., Kim, Y. S. and Han, S. H., "Improved Optical Sensor Fusion in UAV Navigation Using Feature Point Threshold Filter," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 23, No. 1, 2022, pp. 157~168.
- 8) Lee, S. M., "A Study of Fault Diagnosis and Fault Prediction using Sensor Output," (Master dissertation), University of Ulsan, Ulsan, Republic of Korea, 2014
- 9) Ko, S. H., "Prediction-Diagnosis of Failures/Faults and Control Reconfiguration for Multicopter-type Small UAVs," National Research Foundation of Korea, 2019.
- 10) Lee, J. U., Jeon, H. S. and Gwon, D. I., "Trends and Analysis in Domestic and International Fault Diagnosis Research," *Journal of the KSME*, Vol. 56, No. 11, 2016, pp. 37~40.
- 11) Kim, T. G. and Kim, S. K., "Actuator Fault Diagnosis and Counterplan Using Extended Kalman Filter Considering Symmetry of Hexacopter UAV," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 27, No. 7, 2021, pp. 473~481.
- 12) Melody, J. W., Hillbrand, T., Başar, T. and Perkins, W. R., "H ∞ Parameter Identification for Inflight Detection of Aircraft Icing: The Time-Varying Case," *Control Engineering Practice*, Vol. 9, No. 12, 2001, pp. 1327~1335.
- 13) Weston, J., Mukherjee, S., Chapelle, O., Pontil, M., Poggio, T. and Vapnik, V., "Feature Selection for SVMs," *Advances in neural information processing systems*, Vol. 13, 2000.
- 14) Shi, Q. and Zhang, H., "Fault Diagnosis of an Autonomous Vehicle with an Improved SVM Algorithm Subject to Unbalanced Datasets," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 68, No. 7, 2020, pp. 6248~6256.
- 15) Garcia-Bracamonte, J. E., Ramirez-Cortes, J. M., de Jesus Rangel-Magdaleno, J., Gomez-Gil, P., Peregrina-Barreto, H. and Alarcon-Aquino, V., "An Approach on MCSA-Based Fault Detection Using Independent Component Analysis and Neural Networks," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 68, No. 5, 2019, pp. 1353~1361.
- 16) Kim, M. G., Bae, S. H. and Kim, H. I., "Real-Time 3D-LiDAR Object Detection in Autonomous Vehicle Systems Using Cluster-Based Candidates and

Deep Learning,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 25, No. 9, 2019, pp. 795~801.

17) Choi, D. J., Han, J. H., Park, S. U. and Hong, S. K., “Motor Fault Diagnosis in Changed Environments using K-means and CNN,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 26, No. 5, 2020, pp. 348~354.

18) Fan, H., Shao, S., Zhang, X., Wan, X., Cao, X. and Ma, H., “Intelligent Fault Diagnosis of Rolling Bearing Using FCM Clustering of EMD-PWVD Vibration Images,” *IEEE Access*, Vol. 8, 2020, pp. 145194~145206.

19) Jin, J. H., Kang, C. H. and Ko, S. H., “Fault Detection of Receivers and Improvement of Position Estimation Performance by Using Multiple GNSS Receivers,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 24, No. 1, 2018, pp. 102~109.

20) Amin, A. A. and Hasan, K. M., “A Review of

Fault Tolerant Control Systems: Advancements and Applications,” *Measurement*, Vol. 143, 2019, pp. 58~68.

21) Abbaspour, A., Mokhtari, S., Sargolzaei, A. and Yen, K. K., “A Survey on Active Fault-Tolerant Control Systems,” *Electronics*, Vol. 9, No. 9, 2020, pp. 1513.

22) Merheb, A. R., Noura, H. and Bateman, F., “Passive Fault Tolerant Control of Quadrotor UAV Using Regular and Cascaded Sliding Mode Control,” *2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems*, October 2013, pp. 330~335.

23) Wang, X., “Active Fault Tolerant Control for Unmanned Underwater Vehicle With Sensor Faults,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 69, No. 12, 2020, pp. 9485~9495.

24) Lee, S. H. and Yun, B. D., “Industry 4.0 and Fault Prediction, and Directions in Prognostics and Health Management(PHM),” *Journal of KSNVE*, Vol. 25, No. 1, 2015, pp. 22~28.