

## FOD 발생 예방을 위한 무선통신 기반 공구 관리 시스템 연구

박준이<sup>1</sup> · 김명준<sup>2,†</sup><sup>1</sup>신라대학교 항공정비학과<sup>2</sup>한국교통대학교 기계자동차항공공학부

## A Study on a Wireless Communication-based Tool Control System to prevent FOD Occurrence

Junyi Park<sup>1</sup>, Myungjun Kim<sup>2,†</sup><sup>1</sup>Department of Aviation Maintenance Engineering, Silla University<sup>2</sup>School of Mechanical, Automotive and Aeronautical Engineering, Korea National University of Transportation

## Abstract

There are various types of foreign object debris (FOD) in the aviation industry. Tools lost by workers can act as a risk factor throughout aircraft operation, manufacturing, and maintenance fields. Accidents caused by tools lost due to workers' carelessness continue to occur throughout the aviation industry. Aviation-related institutions such as FAA and EASA have established tool control regulations and systems to prevent FOD occurrence. However, in Korea, related regulations and procedures are insufficient. A systematic and effective tool control system is required for reliable manufacturing, airworthiness, operation, and maintenance of aircraft. In this paper, tool control regulations and procedures of domestic and foreign air traffic authorities and aviation industry-related organizations were studied. A wireless communication-based tool control system was proposed based on the NAS 412's tool control regulations certified by the National Standards Association.

## 초 록

항공업계의 외부 이물질(FOD)은 다양한 종류가 있으며 작업자가 분실한 공구는 항공기 제작, 운용, 정비 분야 전반에 걸쳐 위험 요소로 작용하고 있다. 작업자의 부주의에 의해 분실된 공구로 인한 사고는 항공산업 전반에 걸쳐 지속적으로 발생하고 있으며, FAA, EASA 등 항공 관련 기관에서는 FOD 발생 예방을 위해 공구 관리 규정을 제정하고 시스템을 구축하고 있다. 하지만, 국내의 경우 관련 규정 및 절차가 미흡한 수준이며, 항공기의 안정적인 제작 및 인증, 운용 및 정비를 위해서는 체계적이고 효과적인 공구 관리 시스템의 도입이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 국내외 감항당국 및 항공산업 관련 단체의 공구 관리 규정 및 절차를 분석하고, 미국 국립 표준 협회를 통해 인증된 NAS 412의 Tool Control 규정을 바탕으로 국내 항공산업계 도입이 필요한 무선통신 기술 기반의 공구 관리 시스템을 제안하였다.

**Key Words** : Foreign Object Debris(외부 이물질), Wireless Communication(무선통신), Tool Control(공구 관리), Radio-Frequency Identification(주파수 기반 ID 식별 방식, RFID), Bluetooth(블루투스)

## 1. 서 론

외부 이물질(Foreign Object Debris, 이하 FOD)은

항공기 운항과 관리 등에 필수적인 활주로(Runway), 유도로(Taxiway), 계류장(Apron), 격납고(Hanger) 내에 존재하는 이물질로, 운항에 위협을 주는 다양한 형태의 물질들을 일컫는다. 미연방항공청(Federal Aviation Administration, 이하 FAA)에서는 생체 여부와 관계없이 공항 또는 항공 운송업체 직원에게 부상을 입히고 항공기를 손상시킬 수 있는 부적절한 곳에

Received: Nov. 28, 2022 Revised: Jan. 19, 2023 Accepted: Jan. 27, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-43-841-5837, E-mail: myungjun@ut.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

위치한 모든 물체로 정의한다. 공구 관리 프로그램 (Tool control program)은 항공정비사가 활동하는 모든 구역에서 공구의 분실로 인한 FOD 피해를 막기 위한 시스템이다. 공구의 보관 위치를 지정하거나 추적하고 반출목록을 확인하는 등의 방법으로 운영된다.

FOD로 인한 대표적 사고는 2000년 샤를 드골 공항에서 발생한 에어프랑스 소속 콩코드 여객기 F-BTSC 추락사고가 있다. 이륙 중 활주로 내에 있던 티타늄 조각으로 인해 타이어가 터지며 발생한 파편들이 연료 탱크를 치며 화재가 발생하였다. 항공기는 이륙 직후 추락하여 총 113명이 사망하고 지상에 있던 6명이 부상당했다[1]. 미국 Wright Patterson AFB 항공연구소 조사 결과에 따르면 전 세계공항에서 공항 이동지역 내의 이물질에 의해 연간 2억불 이상 피해가 발생한다[2]. 또한 FAA에 의하면 공항 및 활주로 내의 FOD로 인한 직접적인 피해로는 연간 1조 2천억원의 손실이 발생하는 것으로 추정하고 있으며, 항공기의 운항 지연에 따른 평판과 인지도 하락 등 간접손실 비용이 매년 약 13조원 가량 발생함을 밝혔다[2]. 국내에서는 FOD로 인한 인명피해는 없었으나 대한민국 공군에서는 피해가 연평균 20건씩 발생하고 이로 인한 항공기 정비비용이 연평균 7억원씩 발생하는 등 FOD로 인한 피해발생과 준사고로 인한 항공기 정비소요는 상존하고 있으며 예측 불가능한 안전 위협 요소이다. 이처럼 공항 내 시설에서의 FOD로 인한 피해는 지속해서 발생하고 있으며 큰 인명, 물적 피해의 잠재적 원인으로 작용한다.

이러한 FOD의 발생은 공항운영자 입장에서는 가장 우선시 되어야 할 '안전'이라는 요소 및 공항의 이미지와 직결되는 문제이며, 항공사는 FOD로 인한 리턴 및 정비, 지연 보상 등으로 인하여 직, 간접적 손실이 지속해서 발생 될 수 있다. FOD로 인한 안전 저해 요인 중에는 공구의 분실 또한 포함된다. 따라서 이를 방지하기 위한 공구 관리 시스템은 작업자의 망각 혹은 실수로 발생할 수 있는 안전사고를 예방하기 위한 하나의 방법으로 받아들여지고 있으며, FAA, EASA, AIA(Aerospace industries Association, 이하 AIA), 그리고 NASA와 같은 감항당국 및 항공산업 관련 단체에서 FOD 규정에 공구 관리 관련 내용을 포함하고 있다는 점에서 그 필요성을 알 수 있다. 이에 본 논문

에서는 공구 관리 부실로 인한 항공기 사고사례 조사를 통하여 공구 관리 시스템의 필요성을 제시하였으며, 공구 관리와 관련된 국내 항공법과 규정을 조사 및 검토하고 이를 국외 규정과 비교하여 미흡한 점을 분석하였다. 또한, 국외 공구 관리 규정 중 FAA와 NASA의 규정에 공통으로 언급되는 AIA의 NAS 412를 상세히 분석하여 공구 관리 시스템의 요구조건을 만족하는 RFID(Radio-Frequency Identification), Bluetooth, WIFI 기술 기반의 단거리 무선통신 기술을 활용한 공구 관리 시스템을 제안하였다.

## 2. 국내외 공구 관리 규정 분석

### 2.1 공구 관리 부실로 인한 항공기 사고사례

FOD의 종류는 일반적으로 항공기용 부품 및 너트, 볼트, 승객 여행용품, 콘크리트 등이 대표적이며 항공정비사가 분실한 공구 또한 포함된다. 하츠필드 잭슨 애틀랜타 국제공항의 FOD 관리 프로그램 기록에 따르면 2008~2009년 총 487일 동안 886개의 FOD를 제거했으며, 이 중 승객의 물건 혹은 화물이 가장 많은 46%, 콘크리트와 아스팔트가 21%, 지상 장비와 공구가 18%의 비율을 차지했다[3]. 또한 FAA에서 대형공항을 대상으로 한 FOD 분석 보고서에 따르면 활주로 및 램프(Ramp)에서 작업자가 분실한 공구의 발견 빈도가 '잦음(Frequent)', 위험도가 '높음'으로 평가되었으며, 이를 바탕으로 공구가 FOD의 가장 큰 비율을 차지하지는 않지만 항공기의 안전을 위협하는 분명한 요소 중 하나인 것을 알 수 있다[4]. 이와 관련된 사례로 2003년 영국 Turweston Airfield에서 이륙한 YAK-52 항공기가 곡예 기동 도중 기체 정비 후 제거되지 않은 스크류 드라이버가 승강타(Elevator)에 끼어 자세를 회복하지 못하고 지면과 충돌 후 2명이 사망하는 사고가 있었다[5]. 2020년에는 Jetstar 소속 A320 항공기가 이륙 도중 우측 엔진에서 진동과 무엇인가 튀는 소리와 함께 항공기가 중심을 맞추지 못하고 우측으로 기울어져 진행되는 현상이 발생하였으며, 이후 항공기 착륙 후 추가적인 조사 결과 Fig. 1과 같이 엔진의 배기 구역에서 스크류 드라이버 Tip이 엔진의 압축기(Compressor)와 터빈(Turbine)에 심한 손상을 입힌 것을 확인할 수 있었다[6].



Fig. 1 Screwdriver tip and witness marks [6]

이외에도 작업자의 공구 분실 혹은 관리 부실로 인한 항공기 사고사례는 무수히 많으며, 1998년부터 2020년까지 발생한 주요 사건 및 사고사례와 손상부위를 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Accidents due to Absence of a Tool Control System

보고 기관	발생 년도	기종	인명 피해	손상 부위
ATSB	1998	767-338ER	-	Engine
AAIB	2003	YAK-52	2 Fatal	Aircraft
ATSB	2015	AS365 N3 Dauphin	-	Main rotor blade
CASA	2016	Cessna 208B Caravan	-	-
NTSB	2017	SWEARINGEN SA226	-	Propeller, Fuselage
AAIB	2019	Airbus EC 175 B	-	Main rotor blade
ATSB	2020	A320-232	-	Engine

이처럼 단순히 공구 분실에 대한 예방을 작업자의 능력에만 의존한다면 인적 요인(Human factor)에 의해 항공기 안전을 저해하는 상황이 발생할 가능성을 방지하게 되고 이는 항공기 사고로 이어질 수 있다. 따라서, 공구 관리 절차 및 규정을 수립하고 공구 관리 시스템 도입을 통해 예방책을 마련하는 것이 필요하다. 따라서 2.2절에선 우선으로 국외 감항 당국 혹은 협회와 기관에서 규정하고 있는 FOD 발생 예방을

위한 공구 관리 규정을 조사하였다.

## 2.2 국외 FOD 발생 예방을 위한 공구 관리 규정

공구 관리 절차 및 규정 수립의 필요성을 분석하기 위하여 미국, 유럽, 호주를 대상으로 국가별 감항 당국 혹은 협회 및 기관에서 규정하고 있는 FOD 발생 예방을 위한 공구 관리 규정을 조사 및 분석하였다.

### (1) 미국

FAA는 2010년에 FOD로 인한 항공기 사고 발생을 방지하고자 권고 회람 AC (Advisory Circular, 이하 AC) 150/5210-24를 발행하였다[7]. 4장 3절 “Aircraft Maintenance Activities”에서 공항 내 항공 정비 활동에 대한 FOD 관리 권고 사항을 기술하고 있으며 공구 관리를 위한 여러 방법을 제시하며 실행안을 만들 것을 제시하고 있다. 또한 미 항공우주산업 협회 AIA에서 제정한 FOD 관리 지침서 NAS 412의 경우, 9장 “Tool Accountability and Control”에서 항공기 부품 제조과정에서의 공구 관리에 대한 중요성을 언급하고 있으며 Basic, Intermediate, Advanced의 3 단계로 나누어 공구 관리의 원리와 기술, 도입 방법 등을 설명하고 있다[8]. 또한, AIA는 2017년 기준 미 항공산업과 연관된 346개의 회원사를 가진 협회이며, NAS 지침서는 AIA가 회원사와 함께 만든 국가 기준으로 국제 표준화 기구 ISO의 회원 중 하나인 ANSI(American National Standards Institute) 미국 국립 표준 협회를 통해 인증받았다[9]. 대한민국에서도 NAS 412 지침서를 미 항공 산업계와 표준 협회에서 사용하는 하나의 기준으로 신뢰하고 있다. 또한 앞서 언급된 AC 150/5210-24에서 NAS 412를 효과적인 공구 관리를 위한 참고자료로 추천하고 있어 항공기 부품 제조과정뿐만이 아닌 공항 내 FOD 통제에도 유효하게 적용할 수 있다[7]. 미항공우주국에서 제정한 제작시설 내 FOD 관리 규정인 MSFC-STD-3598에서는 항공기 부품 및 완제품 제작시설에서의 FOD 관리 규정을 기술하고 있다. 해당 문서는 Awareness, Control, Critical 3단계의 FOD 관리 구역을 설정하고 구역별 공구 관리 절차를 제시하고 있으며, 공구 관리를 위한 요구 기술 수준 등을 상세히 제시하고 있다 [10]. MSFC-STD-3598 규정은 NAS 412 시스템을

기반으로 만들어졌으며 FAA AC 150/5210-24 절차에서도 공구 관리 규정의 세부적인 참고사항에 대해 NAS 412를 참고할 것을 권고하였다[7]. 따라서 NAS 412에 대한 보다 깊이 있는 분석을 통해 체계적인 공구 관리 시스템을 다음과 같이 확인하였다. NAS 412 9장 “Tool Accountability and Control”에 제시된 단계별 특징은 다음과 같다.

### ① Basic Tool Accountability and Control

자동화 시스템 혹은 공구 관리를 위한 장비의 도입 없이 규정 혹은 규칙으로 구성할 수 있는 일련의 절차를 통해 비교적 소극적으로 공구를 관리하는 단계이다. 이는 인적 요인으로 인해 절차가 무시되거나 지켜지지 않을 수 있으며, 이로 인해 FOD에 대한 완벽한 통제 요인을 제공하지 못한다. 따라서 Basic 절차는 FOD에 대한 위험도가 낮은 구역에서의 최소한의 예방 절차로 소개되고 있다.

### ② Intermediate Tool Accountability and Control

공구 관리를 위해 Fig. 2의 shadow boards, shadow foam, shadow boxes, tool kits와 같은 공구의 윤곽을 나타내고 알맞게 보관하기 위한 장비와 공구의 식별을 위한 태그(Tag)와 같은 외부 장비를 활용하여 공구 관리를 하는 보다 적극적인 방식의 시스템을 제시한다. 또한 공구가 다른 공구 상자와 섞여 정확한 재고 관리가 불가능한 상황이 발생하는 것을 막고 더 구체적인 공구 재고 관리 및 작업 전후 관리 절차를 제시하는 등 정확한 공구의 현황 파악을 위해 초점을 맞추고 있다. 하지만 공구의 재고 관리 및 태그 등 본 단계에서 제안하는 공구 관리 방법은 Basic 단계와 동일하게 작업자 및 관리자가 절차를 수행해야 하며 이는 인적 요인에 의해 관리 시스템이 부정적 영향을 받을 수 있음을 의미한다. 따라서 Intermediate 단계는 FOD에 의한 위험에 비교적 민감한 구역에서 사용될 수 있는 절차를 제안한다.

### ③ Advanced Tool Accountability and Control

FOD 발생에 매우 민감한 구역에서의 공구 관리 시스템이다. 공구 자체의 파손에 따른 FOD 발생을 고려한 공구 설계, 공구를 탐지 및 추적할 수 있는 시스템,

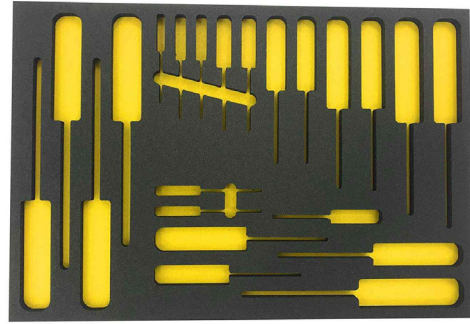


Fig. 2 Shadow Foam

자동화된 공구 재고 관리 시스템, 작업별 맞춤형 공구 키트 제공 등 절차상 발생하는 인적 요인의 영향을 최소화하고 FOD 발생을 막기 위해 자동화 장비 혹은 시스템을 사용한다. 이는 작업자가 공구를 분실한 경우 또는 적절하지 못한 사용으로 인한 공구의 파손 등 예측이 불가능하고 통제가 힘든 상황에서 효과적인 공구 관리가 가능하게 한다.

### (2) 유럽

EASA는 Regulation (EU) No 139/2014 (the ‘Aerodromes’ Regulation), 즉 비행장과 관련된 지침 자료 및 부속서가 정리된 “Easy Access Rules for Aerodromes” 규정집의 AMC1 ADR.OPS.B.016(b)에서 공구 관리와 관련된 내용을 찾을 수 있다[11]. 공구 관리의 중요성을 언급하는 내용은 없으나 공구 분실로 인한 FOD 발생 가능성을 제시하고 이를 정비작업이 끝난 이후에 Tool box, Checklists 등의 요소로 분실을 방지하는 프로그램을 진행할 것을 비행장 내의 항공기 운영자에게 요구하고 있다. 또한 항공법 “PART 145 Maintenance Organization Approvals”에서는 공구의 상태 점검, 분류, 라벨링, 검사, 관리에 관한 사항을 세부적으로 언급하고 있다[12]. 이는 FOD 방지만을 위한 것이 아닌 공구 자체의 적절한 사용과 관련된 폭넓은 규정을 제시하여 공구 관리가 가능하게 한다.

### (3) 호주

호주 교통안전 위원회(Australian Transport Safety Bureau, 이하 ATSB)는 실제 발생하고 있는 공구 분실과 관련된 FOD 사고의 조사 보고서를 통해 공항 내

항공기의 운영자는 효과적인 공구 관리 시스템(Tool Control system)을 갖추고 이를 항공기 운영자의 조직 내에서 실행할 것을 권고하고 있다[6, 13].

국외 FOD 발생 예방을 위한 공구 관리 규정 조사 결과를 요약하면 Table 2와 같다. 이처럼 국외의 경우 공항, 항공기 운영자, 정비 조직, 항공기 부품 및 항공기 제작시설에 대한 공구 관리 규정에 대한 운영기준과 방법이 감항 당국 혹은 AIA, NASA와 같은 기관에 의해 세부적으로 제시된다. FAA AC 150/5210-24 및 EASA의 Easy Access Rules for Aerodromes 규정의 경우 Shadow foam이나 tool box를 통한 간략한 공구 관리 규정을 제안하고 있다는 점에서 유사하다. 그 외의 더욱 자세한 공구 관리 규정 및 방법은 AIA의 NAS 412 혹은 NASA MSFC-STD-3598 규정을 참고하여야 한다. 두 규정은 공구 관리 시스템을 Table 3과 같이 3가지 단계 또는 구역으로 구분하여 FOD를 관리하도록 제시하였다.

**Table 2 Foreign Regulations for tool control**

국가	관리 기관	규정 기재 문서	Tool control 관련 항목
미국	US Gov	CFR Title 14	FAR 145.019(a)
	FAA	AC 150/5210-24	4.3절 a항 6번
	AIA	NAS 412	9절
	NASA	MSFC-STD-3598	5.8절, 6.1절
유럽	EASA	Easy Access Rules for Aerodromes	AMC 1 ADR.OPS.B.016 (b). 347P
		PART 145 A.40	Foreign 6~8절
호주	ATSB	관련 사고 조사보고서	AO-2015-127, AO-2020-058 등

**2.3 국내 FOD 발생 예방을 위한 공구 관리 규정**

대한민국에서 항공과 관련된 여러 법 조항 중 FOD와 공구 관리에 관련된 규정은 행정규칙에서 찾을 수 있다. 국토교통부 고시인 '공항안전운영기준'에서는 활주로 내 이물질에 대한 관리사항을 규정하고 있다[14]. FOD 교육 훈련사항에서 도구 또는 장비의 적절한 통제책임 및 관리에 관한 내용이 포함되어야 함을

**Table 3 NAS 412 and MSFC-STD-3598 Tool Controls**

NAS 412	Basic	Intermediate	Advanced
Tool Controls	Minimum processes where products are at low risk of FOD	Area where products may be sensitive to an elevated risk of FOD	Area where products are sensitive to the highest risk of FOD
MSFC STD-3598	Awareness Area	Control Area	Critical Area
Tool Controls	Not required	Controlled, tethered over IDS hardware Tethered	Tethered, logged, and tracked

제시하고 있지만, 공항 내 작업자 또는 항공기 운영자의 공구 관리 및 책임소재에 대한 운영기준과 관리 방법에 관한 내용은 제시되어 있지 않다.

산림항공본부 훈령인 산림항공본부 정비규정에서는 38조 공구 등의 관리 항목에서 공구의 분실, 항공기 탑재, 폐기를 추적할 수 있도록 그 목록을 작성하도록 하고 있다[14]. 하지만, 그 외의 공구 관리에 대한 기본 규정은 제시되지 않으며 FOD 예방 차원에서의 공구 관리 시스템과 관련된 규정 또한 없다.

대한민국에 있는 공항의 운영자는 항공법 제111조의 3에 따라 공항 운영 규정을 작성한 후 국토교통부장관으로부터 인가받거나 신고하여야 한다[14]. 공항 운영 규정은 공항운영자가 공항 운영증명을 받기 위하여 제출하는 서류로 공항운영자가 관리·운영하는 인력·시설·장비 및 안전관리 시스템 등에 관한 내용을 포함하며 국토교통부 장관으로부터 인가받은 것을 말한다. 인천공항 운영 규정 내에선 FOD 관련 규정은 작업에 의한 FOD 제거, 활주로 내의 FOD 제거 작업에 대한 사항은 언급되어 있다. 하지만, 작업자가 사용하는 도구나 공구로 인해 발생할 수 있는 FOD를 예방하기 위한 관리 규정과 방법은 제시되지 않았다. 이는 김포, 제주공항 운영 규정에서도 같았으며 작업자의 공구 및 도구의 관리와 관련된 체계에 관한 규정 또한 언급되지 않았다.

국내 FOD 관리 규정 중 하나인 '공항안전운영기준'에서는 사고 예방 차원의 공구 관리 체계에 대한 운영기준과 방법이 정리되어 있지 않으며, 관련된 규정 또한 존재하지 않는다. 공항 운영 규정 또한 작업자의 도구 또는 공구의 관리에 대한 세부적인 규정을 제시



하지 않았다. 이처럼 현재 대한민국 내의 FOD 관련 규정은 공구 관리 측면에서 세부적인 절차와 방법을 명확히 제시하는 국외에 비해 미흡하며, 항공기 운전자, 정비 조직, 공항, 항공기 제작시설 등에 적용할 수 있는 명확한 공구 관리 기준 및 시스템을 제시하지 못하는 실정이다.

국내의 경우 유실된 공구가 FOD가 되어 이로 인한 인명피해 혹은 심각한 사고가 발생한 바는 아직 없으나 국외에서는 Table 1에 제시된 사례와 같이 작업자의 부주의에 따른 공구 분실로 인한 인적, 물적 피해 및 사고사례가 발생하고 있다. 이를 바탕으로 국외 항공 관련 기관 및 협회에서는 체계적이고 구체적인 공구 관리 규정을 제정하고 있으며, 국내의 경우에도 사고 및 피해를 사전에 방지하기 위하여 FOD 관리 규정 및 공구 관리 시스템 도입이 반드시 필요하다.

### 3. RFID, Bluetooth, WIFI 무선통신을 활용한 공구 관리 시스템

#### 3.1 공구 관리 시스템의 요구 사항 분석

국내 항공우주산업은 코로나19 사태로 인해 잠시 주춤하였으나 KF-21의 독자 개발 및 비행 성공과 누리호 발사 성공 등을 바탕으로 항공우주 관련 제조산업의 성장이 계속되고 있다. 이에 따라, 높은 신뢰성과 안정성을 가진 항공기 및 발사체 제작, 운용, 정비환경을 조성하기 위해서는 미항공산업협회 AIA와 미항공우주국 NASA에서 규정하고 있는 공구 관리 시스템 도입이 반드시 필요하다. NAS 412에서 제시하는 Advanced Tool control 단계의 분석을 통해 공구 분실 방지를 위한 시스템이 갖춰야 할 기본 요구 사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 공구함에 보관된 공구 목록의 작성, 재고의 확인
- (2) 공구의 정확한 관리를 위한 라벨 및 Tag 부착
- (3) 공구의 분실을 작업자가 쉽게 인지 가능해야 함
- (4) 공구 분실 시 이를 탐색할 수 있도록 지원하는 시스템이 필요함(절차 또는 자동화 시스템)
- (5) 공구를 반출한 작업자의 신원 식별이 가능해야 함
- (6) 공구를 비인가된 인원이 사용하거나 가져가는 것

을 방지해야 함(공구의 보안)

- (7) 수행 작업별로 필요한 공구만을 별도 제공, 혹은 필요한 공구가 포함된 공구함을 별도 제공함
- (8) 공구는 파손되기보단 구부러지는 재질을 사용하고, 최소한의 부품 수로 설계되어야 하며, 공구의 부품이 쉽게 탈착되거나 느슨해져서는 안 됨

위 요구 사항은 NAS 412의 Basic과 Intermediate 단계에서 제안되는 조건인 회사 혹은 단체의 내부 규정과 절차를 정하여 작업자 또는 관리자가 수행하도록 하는 방법을 채택하여도 충족시킬 수 있다. 하지만 절차만으로 통제하는 것은 대부분의 과정을 사람이 직접 수행하고 도구 혹은 장비의 도움은 최소화되기 때문에 인적 요인의 영향을 크게 받는다[2]. 따라서, NAS 412에서 제시하는 공구 관리의 모든 단계는 작업자가 따르기 비교적 쉽지만 무시하기 힘든 절차를 요구하거나, Advanced 단계에서는 자동화된 시스템이 작업자와 독립적으로 통제하는 방법을 통해 관리하도록 규정하고 있다. 본 논문에서는 국외 연구 및 개발 사례를 참고하여 NAS 412의 Advanced Tool Accountability and Control 요구 사항을 만족할 수 있는 무선통신 기술 기반의 공구 관리 시스템을 제안하였다.

#### 3.2 무선통신 기술 기반 공구 관리 시스템

국외에서는 NAS 412 규정을 만족할 수 있도록 공구 관리 시스템을 만들고 상용화하여 판매 중이며, 그 대표적인 예로 미국 Snap-on에서 개발한 Smart Tool Level 5 Tool control System이 있다.



Fig. 3 Level 5 Tool control [15]

해당 제품은 자동재고 관리, 공구 보안, 반출 공구 인식, 공구 상태 보고, 작업자별 공구 분배, Custom Shadow Foam을 활용한 공구 가시성 확보의 기능을 보유하고 있다. 하지만 작업자가 현장에서 스스로 반출한 공구를 확인할 수 없다는 점, 작업 도중 공구가 섞이거나 다른 작업자에게 공구를 전달받는 경우 공구 분실의 책임소재를 파악하기 어렵고 작업자의 작업내용이 불분명해져 분실된 공구의 위치파악을 특정하기 어려운 점, 작업자의 교대나 퇴근 때 반납되지 않은 공구가 있는지 직접 해당 Tool box를 통해 확인해야 한다는 점과 같이 Tool box에만 공구 관리를 의존해야 한다는 한계점과 단점이 있다.

이에 따라, 현장 작업자가 현재 공구의 상태를 파악하고 정리하기 어려우며 공구 분실 후 빠른 대처를 불가능하게 한다는 단점을 보완하고 NAS 412의 요구 사항을 만족하는 공구 관리 시스템을 개발 및 활용할 필요성이 있다. 본 논문에서는 RFID, Bluetooth, WIFI 무선통신 기술을 기반으로 Fig. 4와 같은 공구 관리 시스템을 새롭게 제안하였으며, 이에 대한 세부 시스템별 명칭 및 기능은 다음과 같다.

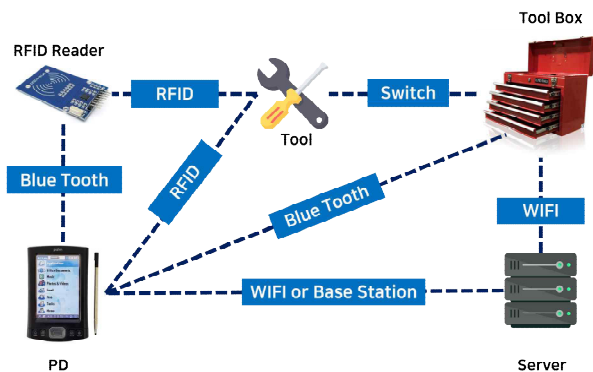


Fig. 4 Wireless Tool control Model

3.2.1 공구 관리 시스템 세부 구성 기능

(1) Smart tool Box

공구를 보관하고 비인가 인원에 대한 보안을 유지한다. 작업자의 PD(Personal Device)에 내장된 RFID를 인식하는 Reader를 장착하여 해당 작업자가 Tool Box를 사용할 수 있도록 인가된 인원인지 구분한 후 공구를 제공한다. 또한 Shadow Foam을 갖추어 모든 공구의 개별적 위치를 지정하고 공구 하단에 Tact

Switch나 압전센서를 삽입하여 해당 공구의 반출 여부를 확인할 수 있도록 한다. 이렇게 반출된 공구 목록은 Tool Box에 삽입된 소형 컴퓨터를 통해 목록화하여 화면에 제공되고 보안 확인 절차에서 인식되었던 PD의 정보를 통해 반출 인원과 함께 기록된다. 또한 공구의 분실 여부를 예측하는 시스템을 포함한다.

본부의 공구 관리 서버와 WIFI를 통해 연결되어 보안 절차에서 확인된 작업자의 교대 시간 및 작업시간과 관련된 요소를 확인하여 작업자가 반출하였던 공구가 퇴근 혹은 교대 이후에도 돌아오지 않으면 공구함의 정보, 기록된 작업자의 인적사항, 분실된 공구, 반출 시간 등을 공구 관리 서버로 전송하여 경고할 수 있는 기능을 포함한다.

(2) Bluetooth System

공구 상자와 Bluetooth 통신을 통해 인가된 작업자가 가져가는 공구 목록을 PD에 업로드하며 공구 상자는 반출된 공구 목록과 작업자 인적 사항 및 사원 번호 등을 기록한다. 작업에 들어갈 때 작업자는 안전조끼를 착용하고 조끼 내엔 RFID Reader가 삽입되어 PD와 블루투스 통신을 통해 정보를 전달한다.

(3) RFID System

공구 상자에서 PD를 인식시키는 기능을 제공한다. 고유 식별 번호를 PD에 기록 후 이를 공구 상자에 인식시키면 공구 상자는 서버에서 해당 식별 번호와 일치하는 작업자의 인적 사항을 가져와 기록하며 이를 다시 본사 서버에 저장하는 시스템을 갖는다. 또한, 공구에 소형 RFID Chip을 삽입하여 Fig. 5와 같은 고유 식별 번호를 부여하여 추적할 수 있게 한다.

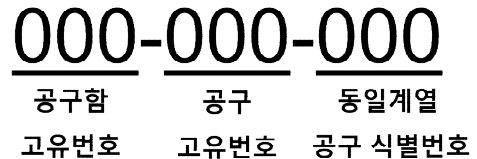


Fig. 5 Tool-specific identification number

앞서 Bluetooth System에서 설명한 바와 같이 작업자는 작업에 들어가기 전 안전조끼를 착용하며, 이때 조끼에는 RFID Reader가 내장되어 있기 때문에 PD와

Bluetooth로 연결된다. 해당 RFID Reader는 작업 도중 분실된 공구를 발견하거나 다른 작업자에게 공구를 전달받았을 경우 공구를 조끼에 마찰하는 행위를 통해 해당 공구를 목록에 반영한다. 공구 분실시 해당 작업자의 PD와 본사의 공구 관리 서버로 WIFI를 통해 전달되며 만일 공구 분실로 인한 탐색 절차가 진행되고 있을 경우 절차를 조기 종료시키는 지표로 회사의 손실을 최소화한다.

#### (4) PD(Personal device)

핸드폰, 스마트 워치, 개인 태블릿 등이 이에 해당할 수 있으나 작업 중 쉽게 소지할 수 있고 몸에 장착이 가능한 유비쿼터스 장비가 가장 적합하다. 작업자가 반출한 공구 목록을 표시하고 작업 중 습득한 공구에 대해서도 표시한다. 또한 작업 후 반출 공구 목록 체크 하여 공구 분실을 방지한다.

#### (5) WIFI or Base Station System

공구 상자는 작업자가 반출한 공구 명세와 인적 사항을 본사 관리 서버로 전송한다. 또한 반출된 공구가 정해진 기한까지 돌아오지 않는다면 이에 대한 경고를 본부 관리 서버와 해당 작업자의 PD로 전송한다. 이때 WIFI를 통한 무선통신 방식을 사용한다. 또한 개인 작업자의 PD가 Tool box와 먼 거리에 있는 것을 대비하여 관리 서버는 기지국을 통해 PD로 해당 경고를 전송한다.

### 3.2.2 공구 관리 시스템 운용 절차

앞서 제안한 공구 관리 시스템의 운용 절차를 공구 반출, 작업, 공구 반납의 일련의 작업 과정으로 설명하면 다음과 같다.

#### (1) 공구 반출

공구 반출을 위해선 먼저 작업자가 PD를 별도의 시설에서 수령해야 한다. 이는 PD 또한 분실 시 FOD가 될 수 있기에 별도의 관리 절차가 필요하다. 이후 PD를 Tool Box에 인식시켜 보안을 해제하고 Bluetooth를 연결한다. 이때 작업자의 인적 사항이 Tool box에 기록된다. 작업자의 인적 사항에 따라 배정된 공구 목록이 Display에 표시되고 추가로 필요한 공구를 반출

하게 된다. 이때 반출되는 공구를 Tool Box가 인식하고 목록을 작성한다. 작업자가 Tool Box를 닫거나 별도의 버튼을 누르면 목록작성이 기록되고 서버로 전송된다.

#### (2) 작업

반출한 공구 목록을 작업 중 PD를 통해 주기적으로 확인하도록 권고한다. 작업환경에서 분실된 공구를 발견하거나 동료에게 공구를 전달받았을 때는 해당 공구를 안전조끼에 문질러 RFID를 인식시키고 Bluetooth를 통해 PD 목록을 업데이트한다. 작업이 마무리되었을 경우 PD 목록을 확인하여 공구를 작업자가 모두가졌는지 한 번 더 확인할 수 있도록 한다.

#### (3) 공구 반납

공구의 반납 시엔 Tool Box에 PD를 인식시켜 작업자의 인적 사항을 등록 후 Tool Box에 공구를 반입하도록 한다. 만일 반출만 기록된 후 반입에 대한 사항이 기록되지 않았다면 Tool box는 반입 절차를 실행하게 된다. 이때 반출한 목록상의 모든 Tool이 복귀되지 않으면 해당 인원에 대한 반입 절차는 종료되지 않는다. 이후 작업자가 퇴근하거나 교대하였을 때까지 목록에 있는 모든 공구가 돌아오지 않았을 때 서버로 경고 문구를 발송한다.

### 3.2.3 NAS 412 요구 사항 충족 여부 검토

본 논문에서 제안한 무선통신을 활용한 공구 관리 시스템이 NAS 412를 기준으로 3.1절에서 분석된 총 7가지 기본 요구 사항을 충족하는지에 대하여 검토하였다.

#### (1) 공구함에 보관된 공구 목록의 작성, 재고의 확인

목록의 작성과 재고의 확인은 Tool Box와 공구 간의 상호작용을 통해 만족시켰다. 앞서 구상한 것과 같이 Tool Box가 Shadow foam이 설치되었고 틀에 맞춰져 공구가 비치되었다고 가정했을 때, 간별로 Tact Switch 혹은 Micro Switch를 설치하여 공구가 반출되면 스위치가 Untact 상태가 되어 어떤 공구가 빠져나갔는지 전기신호로 확인할 수 있다. 이러한 스위치는 Tool Box에 내장될 소형 컴퓨터와 연결되어 해당 신



호를 받아 어떤 공구가 반출되었는지 인식하고 이를 목록화하여 반출한 인원의 정보와 함께 보관함으로써 공구의 목록 확인이 가능하게 한다. 또한 서버에 등록된 반출 인원의 교대 시간 및 현재 퇴근 여부를 주기적으로 점검하여 만일 해당 인원이 반출한 공구가 반납되지 않았음에도 퇴근하거나 교대하면 서버와 PD로 경고신호를 전송함으로써 재고의 확인 및 감시를 할 수 있다.

### (2) 공구의 정확한 관리를 위한 라벨 및 Tag 부착

소형 RFID 칩을 공구에 삽입하는 방법으로 구현한다. Fig. 5의 공구 고유의 식별 부호에는 해당공구의 공구함 번호와 고유번호가 포함되어 있기에 RFID Reader를 통해 공구의 정확한 보관과 추적을 할 수 있으며 이는 Tag를 부착하는 것과 같은 효과이다.

### (3) 공구 분실을 작업자가 쉽게 인지할 수 있어야 함

작업자가 공구 상자에서 반출 공구 목록을 업로드 받고 이를 PD에 업로드 하여 작업 중과 후에 확인할 수 있게 한다. 또한 Tool Box에 Shadow Foam을 설치하여 공구 정리 시 한눈에 알아볼 수 있도록 한다.

### (4) 공구 분실 시 이를 탐색할 수 있도록 지원하는 시스템이 필요함(절차 또는 자동화 시스템)

공구 분실 시 해당 공구를 반출할 당시 인식시켰던 PD에 등록된 인적 사항을 통해 작업자를 확인할 수 있으며 어떤 작업에 투입되었는지를 확인하여 공구 추적이 가능하다. 또한, 현장에서는 작업자가 PD를 통해 작업 후 공구 목록을 한 번 더 확인하고 만일 분실된 공구가 있을 때는 본인이 기억하는 작업 동선을 한 번 더 확인하는 것을 통해 공구를 추적할 수 있다.

### (5) 공구를 반출한 작업자의 신원 식별이 가능해야 함

Tool Box는 보안시스템이 설치되어 PD를 Tool Box에 인식함으로써 인가된 인원만 열 수 있고 이를 기록함으로써 공구 상자를 반출한 인원의 인적 사항을 파악할 수 있다.

### (6) 공구를 비 인가된 인원이 사용하거나 가져가는 것을 방지해야 함(공구의 보안)

Tool box 혹은 서버 시스템상에 등록된 PD만이 공구 상자에 접근 할 수 있다.

### (7) 수행 작업별로 필요한 공구만을 별도 제공, 혹은 필요한 공구가 포함된 공구함만을 별도 제공함

본사 관리 서버에 저장된 작업자별로 할당된 작업에 필요한 Tool List를 Tool Box에 업로드 하여 추천 공구를 제공함으로써 구현할 수 있다.

### (8) 공구는 파손되기보단 구부러지는 재질을 사용하고, 최소한의 부품 수로 설계되어야 하며, 공구의 부품이 쉽게 탈착되거나 느슨해져서는 안 됨

해당 조건은 공구 설계 단계에서의 고려사항이므로 본 시스템에는 포함하지 않았다.

본 논문에서 제안된 공구 관리 시스템은 NAS 412에서 제시된 기본 요구 사항을 모두 충족하고 있으며, 국내외에서 선행 개발된 시스템과는 달리 현장 작업자간 소지 중인 공구 현황과 작업 도중 습득한 공구를 실시간으로 파악할 수 있으며, 본사 관리 서버와 연결되어 공구 분실과 관련된 절차를 능동적으로 수행할 수 있다. 이에 따라, 무선통신 기술을 활용한 공구 관리 시스템을 개발 및 도입한다면 공구로 인한 FOD 발생 가능성을 현저히 낮추고 신뢰도 높은 공구 관리 체계 및 항공기 제작, 운용, 정비 체계를 만들 수 있을 것이다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 국내외 FOD로 인한 항공기 사고사례를 조사하고 FOD 방지를 위한 공구 관리 시스템의 필요성을 제시하였다. 그리고, 국내외 FOD 및 공구 관리 규정을 비교 및 분석하고 국내 규정의 미흡한 점을 제시하였다. 현재 대한민국의 행정규칙과 공항 관리 규정의 경우 공항, MRO, 항공기 제작시설이 갖춰야 할 별도의 공구 관리에 대한 권고나 규정이 마련되어 있지 않았으며, 이는 FAA의 AC 150/5210-24, EASA Easy Access Rules for Aerodromes에 공구 관리에 대한 권고 사항이 있다는 점과 비교하였을 때 국내 공구 관리 및 FOD 통제와 관련된 규정이 미흡함을 알 수 있었다. 또한, FAA와 NASA에서 공통으로 언급된

AIA의 NAS 412 규정을 만족할 수 있는 RFID, Bluetooth, WIFI 무선통신 기술을 활용한 공구 관리 시스템을 제안하였다. NAS 412와 MSFC-STD-3598의 경우 항공기 혹은 장비나 부품을 제조하는 시설에 적용되는 FOD에 대한 규정을 포함한다. 그 신뢰성은 ANSI를 통해 검증된 바 있으며 NASA를 포함한 미 항공우주산업의 여러 기업에서 이 기준을 참고하여 내부 규정을 정하고 있다. 국내 항공산업 분야가 빠르게 발전하고 있는 가운데 국제 수준의 공구 관리 기준 및 규정을 별도로 제정하거나 항공안전기술원(KIAST)의 항공기 인증과 관련된 제작 증명, 부품 등 제작자 증명 승인기준에 FOD 관리 사항 및 제작 시설에 대한 공구 관리 규정 마련 여부를 확인한다면 항공기 제작 품질과 안전성을 높이는 긍정적인 효과를 가져와 고객의 신뢰도를 높이는 요소로 작용될 수 있을 것이다. 또한, 본 논문에서 제안된 무선통신 기술 기반 공구 관리 시스템은 국내 항공업체에 효과적인 공구 관리 체계 및 기술을 제공해 줄 수 있을 것이다. 향후 해당 분야의 추가적인 연구와 실제 규정 제정을 통해 항공 분야에 종사하는 정비기술자의 인적 요인을 효과적으로 제어하고 FOD로 인한 사고발생을 최소화하는데 큰 도움이 되기를 기대한다.

## References

- [1] G.J Hong, "Analysis for FOD Automatic Detection System," *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 20, pp. 210-217, June 2016.
- [2] J.G. Lee, *Infrastructure and Transport, Development of FOD Automatic Detection System in Runway*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014.
- [3] C Daniel Prather, *Current Airport Inspection Practices Regarding FOD (Foreign Object Debris/Damage) ACRP Synthesis 26*, National Academy of Sciences, 2011.
- [4] Edwin E. H. David Mayer. and Sidney Majumdar, *Foreign Object Debris Characterization at a Large International Airport*, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2015.
- [5] Air Accidents Investigation Branch, *Yak-52, G-YAKW*, Air Accidents Investigation Branch, 2014.
- [6] Australian Transport Safety Bureau, *Engine power loss and low-speed rejected take-off, involving Airbus A320-232 registered VH-VFF*, Australian Transport Safety Bureau, 2021.
- [7] Michael J. O, *Airport Foreign Object Debris (FOD) Management. AC 150/5210-24*, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2010.
- [8] Aerospace Industries Association, *Foreign Object Damage (FOD) Prevention Guidance Document. NAS 412 Rev 2*, Aerospace Industries Association, 2018.
- [9] Aerospace Industries Association - Our Members, [www.aia-aerospace.org/](http://www.aia-aerospace.org/).
- [10] National Aeronautics and Space Administration, *Standard For Foreign Object Damage/Foreign Object Debris (FOD) Prevention. MSFC-STD-3598 Rev D*, National Aeronautics and Space Administration Marshall Space Flight Center, Alabama, 2021.
- [11] European Union Aviation Safety Agency, *Easy Access Rules for Aerodromes*, European Union, 2022.
- [12] European Union Aviation Safety Agency, *Foreign Part-145 approvals - Tools & Equipment*, European Aviation Safety Agency, 2022.
- [13] Australian Transport Safety Bureau, *Foreign object damage involving a Eurocopter AS365 N3 Dauphin, VH-WPX*, Australian Transport Safety Bureau, 2016.
- [14] Ministry of Government Legislation - Korea Law Information Center, [www.law.go.kr/LSW/main.html](http://www.law.go.kr/LSW/main.html).
- [15] Snap On level5, <https://snaponlevel5.com/>.