Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 24, No. 10 pp. 255-261, 2023

https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.10.255
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

회전익 항공기 연료계통의 STPA 적용 연구

나성현*, 손원애
국방기술품질원

A Study on the Application of STPA in Rotorcraft Fuel System

Seong-Hyeon Na*, Wonae Son
Defense Agency for Technology and Quality

요 약 STPA(체계 이론 프로세스 분석)는 STAMP(체계 이론 사고 모델과 프로세스)에 기초를 둔 새로운 위험분석 기술로, 국내 군수 사업에서의 적용은 찾아보기 힘들다. 본 논문에서 STPA를 적용하기 위해 제공하는 도구는 없지만, 품질관리 관점에서 적용할 수 있는 과정을 소개한다. 회전익 항공기 연료계통은 여러 구성품이 상호작용하는 체계로 제어 가능한 부분이 많고, 위험성이 높기에 선정되었다. STPA는 기본적으로 4단계로 수행한다. 첫 번째 단계는 손실과 위험을 정의하고, 분석 목적을 설정한다. 두 번째 단계는 제어 고리 형태로 제어 주체, 객체, 제어 명령, 피드백을 이용하여 제어 구조를 도식화한다. 세 번째 단계는 불안전한 제어 명령을 도출하고, 네 번째 단계는 원인 시나리오를 도출하는 것이다. 본 논문은 품질요소 확인 단계를 추가하여 회전익 항공기 연료계통에 STPA를 적용하는 연구를 한 것이다. 추가된 마지막 단계는 원인 시나리오를 바탕으로 위험에 영향을 줄 수 있는 품질요소 확인에 사용한다. 결과는 방법론을 복잡한 체계에 적용할 수 있다는 것을 보여주며, 품질관리를 위해 참고할 수 있는 기초 데이터로 활용할 수 있을 것이다.

Abstract "System theoretic process analysis" (STPA) is a new hazard analysis technique based on "system theoretic accident model and process" (STAMP), but its use in domestic munitions-industry applications is scarce. In this study, there were no tools that provide guidance during the analysis, but we introduced a process that can be applied from a quality management. STPA basically consists of 4 steps. Step 1 defines losses and hazards of the system and the purpose of the analysis. Step 2 models the control structure in the form of a control loop using controllers, controlled processes, control actions, and various feedback. Step 3 identifies unsafe control actions. Step 4 identifies causal scenarios. This study researched the application of STPA to a rotorcraft fuel system by adding a step of quality factor verification. A rotorcraft fuel system is a highly dangerous system in which several sub-systems interact, and it has controllable components. The added final step is used to check quality factors that may affect the risk based on the causal scenario. The results show that the methodology can be applied to complex systems. Also, it can be used for basic data for quality management.

Keywords : STPA, STAMP, Rotorcraft Fuel System, Quality Management, Control Structure

1. 서론

군수품 중 회전익 항공기에 대한 품질관리 방법은 위험을 발생시킬 수 있는 품질요소를 확인하고 이를 중점적으로 관리하는 것이다[1]. 현재 품질관리 방법은 신뢰성 도구인 고장 나무 분석(Fault Tree Analysis, 이하 FTA), 고장 유형 영향 분석(Failure Mode and Effect Analysis, 이하 FMEA) 등을 활용하고 있으며 이를 통해 체계의 품질요소를 분석한다. 최근에 품질관리 도구는 인과적 개념을 가지고 있으며, 도구의 한계를 벗어나고

*Corresponding Author : Seong-Hyeon Na(Defense Agency for Technology and Quality)
email: coolnac@naver.com
Received August 1, 2023 Revised August 29, 2023
Accepted October 6, 2023 Published October 31, 2023

자 체계(system)의 하위인 부-체계(sub-system), 구성품(object), 부품(part) 간의 연계된 요소뿐만 아니라 사용자 운용 환경까지 확인하는 방법으로 발전해나가고 있다. 이러한 발전 방향은 체계가 커지고 복잡해지면서 하위 체계 간의 상호작용뿐만 아니라 외적 요소도 고려하는 방법이 필요했기 때문이다. 여기서 외적 요소는 규제, 시장, 국제환경 등이 아닌 공정 또는 품질관리에서 사용하고 있는 용어인 5M1E(인적(man), 장비(machine), 측정(measure), 재질(material), 방법(method), 환경변화(environment))를 뜻한다[2]. 회전익 항공기에 대한 품질관리는 앞서 언급된 FTA, FMEA 등의 도구를 활용하지만, 하나의 특정 요소가 특정 문제를 가지고 있음을 가정한다는 점에서 한계점을 가지 때문에 도구 및 방법론 발전이 중요하다.

Leveson은 인과적 개념을 가진 분석 방법의 한계점을 개선하기 위해 체계의 잠재적인 위험과 발생 원인을 분석하는 기법으로 체계 이론 사고 모델과 프로세스(System Theoretic Accident Model and Processes, 이하 STAMP)를 제시하였다[3]. STAMP는 2가지 도구인 체계 이론 프로세스 분석(System Theoretic Process Analysis, 이하 STPA)과 체계 이론 원인 분석(Causal Analysis based on System Theory, 이하 CAST)으로 구성된다. STPA는 잠재적인 위험 원인을 분석하여 위험을 제거 및 제어하기 위한 사전(事前)분석 방법이다. STPA의 장점은 체계의 안전을 확보하기 위해 안전 제약사항을 확인 및 제어하고, 부적절한 제어 찾기에 중점을 둔다. CAST는 발생한 사건 또는 사고를 조사하고, 관련 요인을 식별하는 사후(事後)분석 방법이다. STPA와 CAST는 제어 구조 모델을 쓴다는 공통점을 가지지만, STPA는 잠재적인 위험요소를 분석할 때 사용하고, CAST는 이미 사건이 발생한 요소를 확인하는데 사용한다는 차이점이 있다.

본 논문의 목적은 STPA를 품질관리 관점에서 적용하기 위해 적용 과정과 방법을 알아보는 것이다. STPA를 적용하기 위한 프로그램은 없지만, 회전익 항공기 연료계통을 예시로 STPA 적용 과정을 소개한다. 기존 STPA는 4단계로 분석하는데, 본 논문에서는 품질요소 확인 단계를 추가하여 5단계 분석 방법을 제시한다. 회전익 항공기 연료계통은 다른 계통에 비해 연료 누출 등의 위험성이 높아서, 품질요소를 확인하는 것이 중요하다. 또한, 연료계통은 여러 구성품이 상호작용하고 사용자가 제어 가능한 부분이 많아서 해당 방법을 적용하기에 적합하다.

2. 본론

2.1 연구 동향

STPA는 자동차, 선반, 항공 등의 분야에서 이용하고 있고, 최근에는 소프트웨어까지 그 분야가 확장되고 있다.

국외 연구 동향을 살펴보면, Abdulkhaleq 등은 안전 소프트웨어를 개발하기 위해 STPA를 적용하여 소프트웨어 안전 요구사항, 조작자의 안전 거동 모델, 설계 및 테스트 등을 확인하였다[4]. Shaban 등은 의학용 산소공급 시스템에 대한 불안전 요소 확인을 위해 STPA를 적용하여 건강 관리 영역에서 사용하였다[5]. Sultana 등은 액화천연가스 운반선에 대해 STPA를 적용하여 인적, 소프트웨어, 구성품, 외부 요인 등을 확인하였다[6]. Mahajan 등은 차선 유지 시스템에 대해 STPA를 적용하여 전동 조향 시스템을 중점으로 위험요소를 확인하였다[7]. Bu 등은 리튬-이온 배터리 에너지 저장 시스템에 대해 STPA를 적용하여 위험과 안전요소를 확인하였다[8].

2.2 품질관리와 STPA

Fig. 1은 개발, 운용단계로 구분된 계층적 제어 구조(hierarchical control structure)를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 STPA는 체계 개발과 운용단계의 중간에 적용되어 유지보수를 위한 환경 및 운용 중 문제 사항을 확인하기 위해 사용한다. 품질관리는 개발, 양산, 운영단계에 걸쳐 적극적으로 수행해야 하고, 각 단계의 피드백(feedback)을 통해 체계를 점진적으로 발전해 나아가는 역할이다.

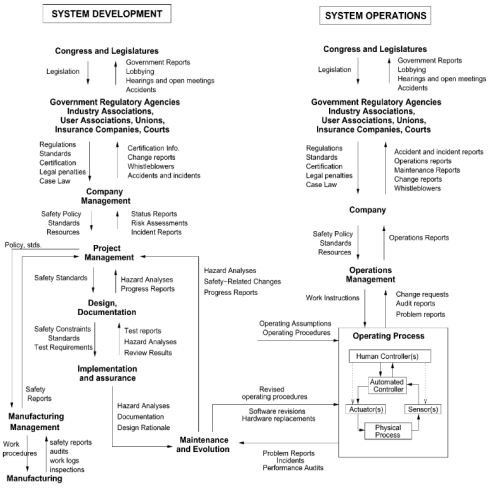

Fig. 1. Generalized control structure model[3]

Fig. 2는 품질관리 관점에서 STPA를 적용한 제어 구조를 제시한 것이다. 제어 주체(controller)는 사람, 기기, 소프트웨어 등 제어 명령을 내리는 주체를 나타낸 것이다. 제어 주체는 명령과 피드백을 통해 정보를 주고, 받을 수 있다. 제어 명령을 수행하는 객체는 작동기(actuator), 제어 처리(controlled process), 센서(sensor) 등이 있다. 여기서 품질관리는 유지보수로부터 위험요소를 공유하고, 유지보수는 STPA를 통해 문제 사항을 기록하고, 변화된 사항을 접수하여 이를 처리하는 방식으로 활용한다. 품질관리는 사업관리에 위험요소와 경과 사항을 공유하고, 표준, 규제, 시험 요구사항 등을 확인한다.

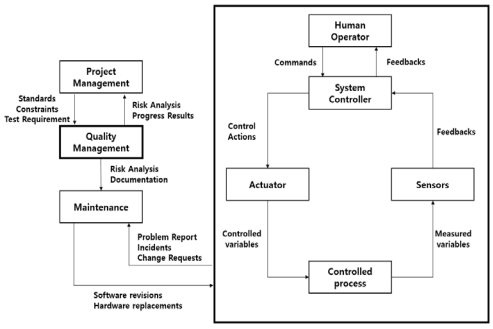

Fig. 2. Generalized control structure diagram

2.3 STPA 적용 방법

Fig. 3은 기본적인 STPA 방법을 나타낸 것이다. STPA는 하향식 분석체계로 4가지 단계(위험 정의, 제어 구조 도식화, 불안전한 제어 활동 도출, 원인 시나리오 도출)로 수행하며, 위험을 분석하고 싶은 체계의 부-체계 또는 구성품에 적용한다[9].

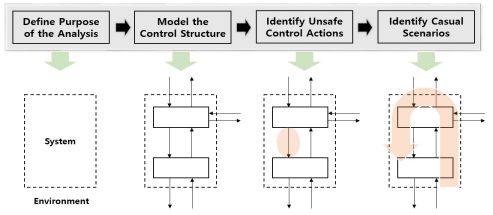

Fig. 3. Basic STPA method

Fig. 4는 본 논문에서 적용한 STPA 과정을 도식화한 것으로, 회전익 항공기 연료계통을 대상으로 STPA를 적용하고, STPA 결과를 통해 품질요소를 확인하는 단계를 추가하여 5단계로 분석한다.

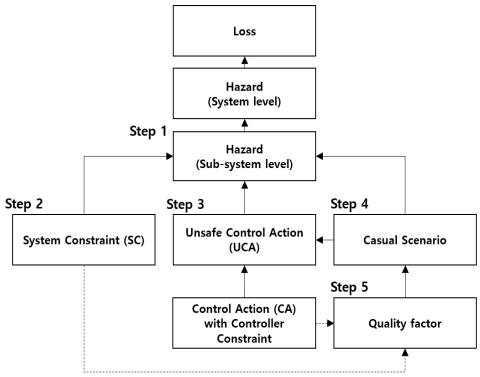

Fig. 4. Applied STPA method

회전익 항공기는 다른 체계에 비해 운용 중 추락에 대한 위험성이 높아 모든 계통이 내추락성(crashworthiness)을 가진다. 특히, 연료 누출로 인해 연쇄적인 위험성이 높은 연료계통은 지상/공중 급유, 엔진 연료공급, 연료탱크 간 연료이송, 벤트(vent), 가압, 연료량 측정, 연료압 관리 등의 기능을 가진다. 연료 구성품은 펌프, 밸브, 계측, 센서 등이 있으며, 발생 가능한 고장 유형을 분석하는 것이 필요해서 예시로 선정되었다.

2.3.1 (1단계) 위험 정의

위험 정의 단계는 체계 수준에서 안전 제약사항을 확인하여 손실(loss)과 위험(hazard)을 정의한다. 손실은 인적 손실 및 상해, 재산 피해, 환경 오염 등 통제 범위를 넘어선 것이며, 위험은 최종적으로 손실로 통제 가능한 영역이다.

Table 1은 항공기의 손실과 위험을 정의한 것이다. 항공기의 손실은 사람에게 발생할 수 있는 위험과 항공기 자체의 비용 손실 등이 있다.

Table 1. Losses and hazards of rotorcraft

Losses	Description
L1	Loss of lift or serious injury to people
L2	Damage to the aircraft or objects outside the aircraft
L3	Inability to complete the mission
Hazards	**Description**
H1	Controlled flight of aircraft into terrain
H2	Inability to control the aircraft
H3	Aircraft departs designated taxiway, runway, or apron on ground
H4	Object is subject to unnecessary stress

Table 2는 Table 1에서 제시한 항공기 위험 중 H2인 항공기 제어 불가의 하위 위험으로 정의한 것이다. 본 단계는 위험을 전체적으로 다룰 수 있지만, 연료계통에 밀접하게 연계된 것으로 선정한다.

Table 2. Loss and hazards of rotorcraft fuel system

Hazards	Description
H2-1	Loss of operation of transfer pump when fuel tank groups are imbalance
H2-2	Unfueled the engine
H2-3	Loss of caution warning when fuel is leaking

Table 3은 회전익 항공기 연료계통의 3가지 위험에 관련된 안전 제약사항을 각각 정의한 것이다. 안전 제약사항은 위험 정의에서 확인한 사항에 대하여 체계에 적절한 상태 유지 또는 실행하는 것이다.

Table 3. Safety constraint(SC) of rotorcraft fuel system

Safety constraint	Description
SC1	Operation of transfer pump when fuel tank groups are imbalance
SC2	To supply fuel the engine
SC3	Caution warning when fuel is leaking

2.3.2 (2단계) 제어 구조(control structure) 도식화

제어 구조는 제어 고리(control loop) 형태로, 제어 주체(controller)와 객체(controlled process), 제어 명령(control action), 피드백으로 구성된다.

Fig. 5는 회전익 항공기 연료계통의 제어 구조를 나타낸 것이다. 제어 주체는 명령을 내릴 수 있는 소프트웨어가 될 수도 있지만, 회전익 항공기는 직접 조작하기 때문에 사람(사용자)으로 설정한다.

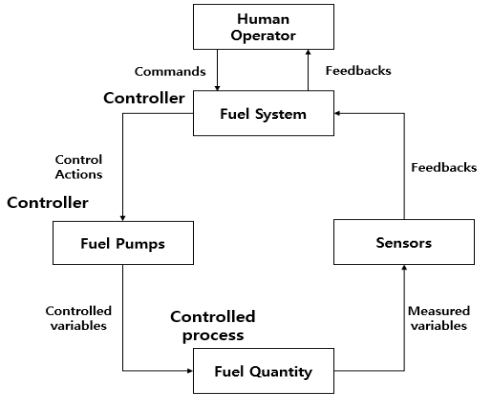

Fig. 5. Control structure of rotorcraft fuel system(1)

Fig. 6은 프로세스 모델(process model)을 포함하여 구체적으로 제어 구조를 도식화한 것이다. 제어 주체는 연료 제어 패널(Fuel Control Panel, 이하 FCP)에 있는 스위치를 통해 이송 펌프와(transfer pump) 승압 펌프(boost pump)를 구동하여 연료량 불균형을 자체적으로 제어할 수 있다.

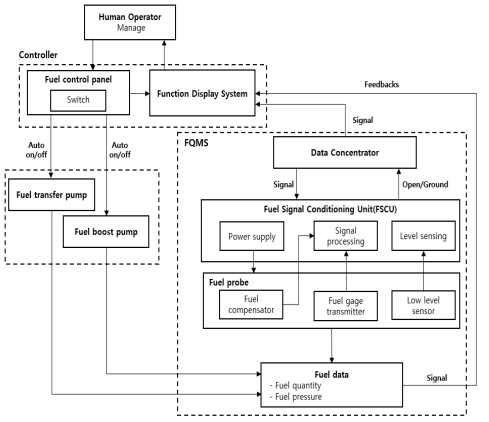

Fig. 6. Control structure of rotorcraft fuel system(2)

펌프의 작동으로 연료 탱크(fuel tank)의 연료량은 연료량 측정장치(Fuel Quantity Measurement System, 이하 FQMS)를 통해 확인할 수 있다. 연료량 측정장치는 연료량을 확인할 수 있는 연료량 탐침기(probe), 탱크 내 연료가 기준 이하인 것을 확인하는 저 연료 센서(low level sensor)로 구성된다. 탐침기와 센서 등에서 수집된 정보는 연료 신호처리장치(Fuel Signal Conditional Unit, 이하 FSCU)에서 수집한 뒤, 사용자는 기능 시현 체계(Function Display System, FDS)에서 제어 명령과 피드백을 확인할 수 있다.

2.3.3 (3단계) 불안전한 제어 활동 도출

불안전한 제어 활동(Unsafe Control Action, 이하 UCA) 도출 단계는 체계에 위험을 유발할 수 있는 제어 명령의 불안전한 사항을 정의하는 것이다.

Table 4는 4가지 제어 명령에 대해 4가지 유형으로 발생하는 UCA를 나타낸 것이다. 여기서 4가지 유형으로 발생하는 UCA는 각각 '제공하지 않았을 경우', '제공하였을 경우', '너무 늦거나 빠를 경우(too late / early)', '너무 길거나 짧을 경우(too long / soon)'로 구분할 수 있다. 4가지 유형은 분석에 따라 과감 조절할 수 있으며, 본 논문은 '너무 늦은 경우(too late)'와 '너무 긴 경우(too long)'에 대해서 분석한다.

Table 4. Control actions(CAs) and unsafe control actions(UCAs) of rotorcraft fuel system

Control Actions	Not provided	Provided	Too late	Too long
(CA 1) Fuel transfer pump command	(UCA 1-A) Fuel transfer pump is not controlled when fuel tanks are imbalance.	(UCA 1-B) Fuel transfer pump is continuously activated when fuel tanks are balance.	(UCA 1-C) Fuel transfer pump is activated too late when fuel tanks are imbalance.	(UCA 1-D) Fuel transfer pump is activated too long when fuel tanks are imbalance.
(CA 2) Fuel boost pump command	(UCA 2-A) Fuel boost pump is not controlled when the engine not allows to suck up fuel within range.	(UCA 2-B) Fuel boost pump is continuously activated when the engine allows to suck up enough fuel within range.	(UCA 2-C) Fuel boost pump is activated too late when the engine needs to suck up fuel within range.	(UCA 2-D) Fuel boost pump is activated too long when the engine not allows to suck up fuel within range.
(CA 3) Fuel quantity data	(UCA 3-A) Operator does not check when fuel quantity information is missing.	(UCA 3-B) Operator does not active when wrong fuel quantity information is provided.	(UCA 3-C) Operator is not active when fuel quantity information is provided too late.	(N/A)
(CA 4) Fuel pressure data	(UCA 4-A) Operator does not check when fuel pressure information is missing.	(UCA 4-B) Operator does not check when wrong fuel pressure information is provided.	(UCA 4-C) Operator does not check too late when fuel pressure information is provided.	(N/A)

Table 4에서 연료이송 펌프, 연료 승압 펌프, 연료 데이터에 대한 주요 UCA 결과는 다음과 같다.

- 연료이송 펌프 : 비정상 작동 시, 회전익 항공기의 불균형을 발생
- 연료 승압 펌프 : 펌프 비정상 작동 시, 연료를 엔진에 비정상 공급
- 연료량과 연료압력 데이터 : 조종사에게 정보 미제공

2.3.4 (4단계) 원인 시나리오 도출

원인 시나리오(causal scenario) 도출 단계는 손실 시나리오(loss Scenario)로도 불리며, 제어 구조를 기반으로 제어 명령이 왜 불안전하게 제공되었는지 확인하는 단계로, 3단계의 UCA를 통해 원인 시나리오를 도출할 수 있다. Table 4를 통해 각각의 원인 시나리오를 도출해야 하지만, 본 논문에서는 하나의 예시인 UCA 1-A에 대해서 다음과 같이 제시한다.

- 조종사가 연료이송 펌프를 작동하려 했지만, 연료이송 펌프가 작동하지 않는다. 결과적으로 회전익 항공기의 연료량이 불균형을 유지하고 있어서 위험을 초래할 수 있다. 이에 가능한 원인은 연료 제어패널의 스위치 결함, 연료이송 펌프의 모터 결함, 연료이송 펌프에 연결된 연료공급 라인(line)의 누유, 연료 신호처리장치의 신호 오류가 있다.

여기서, 원인 시나리오 도출 단계는 개별적인 원인 요소를 도출하는 것이 아니라 요소들의 상호작용을 확인해야 한다. 이를 통해 4단계 결과는 안전 요구사항을 재확인하는 단계로 다양한 시나리오를 도출할 수 있다.

2.3.5 (5단계) 품질요소 확인

품질요소 확인 단계는 STPA를 통해 분석된 원인 시나리오를 바탕으로 체계의 위험에 영향을 줄 수 있는 부-체계 또는 구성품에 대한 인터페이스를 확인한다. Table 5는 4단계를 통해 확인된 원인 시나리오에 영향을 미치는 품질요소를 확인한 결과이다. 결과는 각 UCA에 대해서 영향을 미치는 품질요소를 확인할 수 있고, 이를 통해 품질관리 시 중점 품목으로 지정할 수 있다.

Table 5. Quality factor for causal scenario

UCA	Quality factor for causal scenario
UCA 1-A	Fuel Control Panel(FCP) Fuel transfer pump motor Fuel line Fuel Signal Conditioning Unit(FSCU)
UCA 1-B	Fuel Control Panel(FCP) Fuel sealing valve Fuel Signal Conditioning Unit
UCA 1-C	Fuel Control Panel(FCP) Fuel probe Fuel Signal Conditioning Unit
UCA 1-D	Fuel Control Panel(FCP) Fuel probe Fuel Signal Conditioning Unit
UCA 2-A	Fuel Control Panel(FCP) Fuel boost pump Bleed valve Engine fuel valve Check valve Fuel shutoff valve Engine
UCA 2-B	Fuel Control Panel(FCP) Fuel boost pump Fuel shutoff valve

UCA 2-C	Fuel Control Panel(FCP) Fuel boost pump
UCA 2-D	Fuel Control Panel(FCP) Fuel boost pump
UCA 3-A	Fuel probe Fuel low level sensor Fuel Signal Conditioning Unit(FSCU)
UCA 3-B	Fuel probe Fuel low level sensor Fuel Signal Conditioning Unit(FSCU)
UCA 3-C	Fuel compensator Function Display System(FDS)
UCA 4-A	Fuel relief valve Fuel line
UCA 4-B	Fuel probe
UCA 4-C	Function Display System(FDS)

3. 결론

본 논문은 회전익 항공기 연료계통의 STPA 적용을 통해 품질관리 관점에서 활용할 수 있는 방법론을 제시한 것이다. STPA는 체계 이론 사고 모델의 하나로서, 인적 오류를 줄이기 위해서 주로 제조 공학 또는 작업장의 안전에 적용하고 있으며, 국내외 연구를 통해 적용 범위를 넓히고 있다. STPA 장점은 초기 설계 과정 중 식별하지 못한 위험 사항에 대해 피드백할 수 있다. STPA는 체계 또는 부-체계, 구성품 등에 대해 제어 구조를 확인하고, 불안전한 제어 명령을 내릴 수 있는 원인 시나리오를 분석하여 안전 제약요소를 검토하는 단계로 수행한다. 본 논문에서 제시한 방법론은 기존 STPA의 4단계에서 품질요소 확인 단계를 추가하고, 이를 통해 품질관리에 중점을 둘 수 있는 품목을 식별할 수 있다. 본 논문은 회전익 항공기 품질관리 관점에서 적용할 수 있는 STPA 방법론을 제시한 것으로, 국외 사례는 체계 개발 시 주로 사용하는 적용 연구와 차별성을 가진다. 회전익 항공기는 지상에서 사용하는 다른 체계와 다르게 인적 위험요소에 중점을 두기 때문에, 연료계통을 예시로 들었지만 다른 계통을 예시로 들더라도 위험 관련한 사항은 제약을 둘 수밖에 없다. 또한, STPA는 제어 구조를 간단하게 도식화하면 UCA와 원인 시나리오 도출도 간단해지고, 제어 구조를 구체적으로 도식화하면 UCA와 원인 시나리오 도출도 구체적인 결과를 나타낼 수 있다.

본 연구는 STPA 방법론을 활용하기 위해 별도의 도구 없이 회전익 항공기 연료계통 품질요소 분석 결과를 제시한다. 품질요소에 대한 검증을 위한 프로세스는 연계되어 있지 않으므로, 연구결과를 일반화하는데 제한점이 있다. 향후, 연구 방향으로 결함이 발생 된 체계나 구성품에 대해 분석하는 방법인 CAST를 활용한 결과와 본 연구에서 제시한 STPA 결과를 연계하는 방향이 필요할 것으로 사료된다.

References

[1] S. H. Na, G. E. Lee, "Fuzzy FMEA for Rotorcraft Landing System", *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol.22, No.1, pp.751-758, 2021.
DOI: http://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.751

[2] B. C. Shin, W. Y. Hwang, N. S. Ahn, D. H. Kim, G. L. Lee, B. K. Jang, J. H. Byun, "Suggestions on enhancing the effectiveness of government quality Assurance Activities for military supplies in production stage", *Journal of Society Quality Management*, Vol.44, No.1, pp.153-166, March. 2016.
DOI: http://dx.doi.org/10.7469/JKSQM.2016.44.1.153

[3] N. Leveson, "A new accident model for engineering safer system", *Safety Science*, Vol.42, pp.237-270, 2004.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X

[4] A. Abdulkhaleq, S. Wagner, N. Leveson, "A comprehensive safety engineering approach for software-intensive systems based on STPA", *Procedia Engineering*, Vol.128, pp.2-11, 2015.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.498

[5] A. Shaban, A. Abdelwahed, G. D. Gravio, I. H. Afefy, "A systems-theoretic hazard analysis for safet-critical medical gas pipeline", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.77, 2022.
DOI: http://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104782

[6] S. Sultana, P. Okod, S. Haugen, J. E. Vinnem, "Hazard analysis : Application of STPA to ship-to -ship transfer of LNG", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.60, pp.241-252, 2019.
DOI: http://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.04.005

[7] H. S. Mahajan, T. Bradley, S. Pasricha, "Application of systems theoretic process analysis to a lane keeping assist system", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.167, pp.177-183, 2017.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2017.05.037

[8] Y. Bu, Y. Wu, X. Li, Y. Pei, "Operational risk analysis of a containerized lithium-ion battery energy storage system based on STPA and fuzzy evaluation", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol.176, pp.627-640, 2023.
DOI: http://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.023

[9] A. Yousefi, M. R. Hernandez, "Using a system theory based method(STAMP) for hazard analysis in process industry", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.61, pp.305-324, 2019.
DOI: http://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.06.014

나 성 현(Seong-Hyeon Na) [정회원]

• 2017년 2월 : 충남대학교 일반대학원 기계공학과 (기계공학석사)
• 2017년 9월 ~ 2019년 12월 : 국방과학연구소 연구원
• 2019년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

〈관심분야〉
품질경영, 기계공학, 항공공학, 신뢰성공학

손 원 애(Wonae Son) [정회원]

• 2019년 2월 : 부경대학교 전자공학부 (전자공학학사)
• 2019년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

〈관심분야〉
국방품질경영, 통신, 전기소자