

퍼지 이론 및 HEART를 이용한 회전익 항공기 유압계통의 인적 오류 분석 방법

나성현*, 박연동
국방기술품질원

Human Error Analysis Method in Rotorcraft Hydraulic System Using Fuzzy Theory and HEART

Seong-Hyeon Na*, Yeon-Dong Park
Defense Agency for Technology and Quality

요 약 군수품의 품질보증활동은 5M1E에 따른 프로세스 검토를 수행한다. 프로세스 검토는 5M1E(인력, 자재, 기계, 방법, 측정, 환경)에 대한 영향을 확인하고, 체계 신뢰성에서 인적 오류로 인해 품질에 영향을 주는 요소를 확인할 수 있다. HEART(인적 오류 평가와 감소 기술)는 인적 오류 확률(HEP)을 계산하기 위해 사용되는 강건 모델이다. HEART는 9가지의 일반 업무 유형(GEP), 38가지의 오류 공정 조건(EPC), 그리고 전문가에 의해 평가된 영향의 비율(APOA)로 구성한다. 평가된 영향의 비율은 공정의 중요성에 따라 각 오류 공정 조건의 가중치를 가진다. 본 논문에서, 접근법은 퍼지 이론을 사용하여 전문가의 의견을 수치적으로 표현할 수 있다. 퍼지 이론은 삼각형 소속도 함수를 통해 수치적인 집합으로 사용한다. 또한, 유사 집합 모델은 각 오류 공정 조건의 평가된 영향의 비율을 계산하기 위해 적용되었다. 제안된 방법론은 회전익 항공기 유압계통의 주요 3가지 공정에 대해 인적 오류 확률을 예측하기 위해 적용되었다. 이 방법론은 회전익 항공기 공정에 대해 인적 오류를 감소하고 품질을 향상하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

Abstract The quality assurance of munitions is the process investigation with 5M1E(man, material, machine, method, measurement, environment). Process investigation contributes effects for 5M1E and can detect the factors that affect the quality to address human error in system reliability. Heart error assessment and reduction technique(HEART) is a robust modelling tool that was applied to determine human error probability(HEP). There are nine generic error probabilities(GEPs), a list of 38 error-producing conditions(EPC), and engineer's assessed proportion of affect(APOA). The APOA is the weight of each EPC according to its importance. In this paper, the approach taken makes use of fuzzy theory so that an expert's opinion can be translated into mathematical terms. Fuzzy theory uses numerous aggregations known as triangular forms with membership functions. Also, a similarity aggregation method was applied to compute the APOA of each EPC. The proposed method was applied to predict HEP for three main tasks of the hydraulic system of rotorcraft. This method is useful for reducing the human error and improving the quality in a rotorcraft task.

Keywords : HEART, Rotorcraft, Fuzzy, Similarity Aggregation Method, Human Error Probability

*Corresponding Author : Seong-Hyeon Na(Defense Agency for Technology and Quality)

email: coolnac@naver.com

Received September 1, 2022

Accepted October 7, 2022

Revised October 4, 2022

Published October 31, 2022

1. 서론

인적 오류(human error)는 사람의 실수로 인해 발생 되는 것으로, 인지 체계의 일부로서 보편적인 현상이다 [1]. 인적 오류는 주어진 업무를 수행하는데 필요한 행동을 시간과 정확도에 대해서 기준에 못 미치거나 업무 완수에 불필요한 행동을 뜻한다. 인적 오류의 분류는 크게 4가지로 행동의 과실(slip), 망각(또는 건망증)(lapse), 조작 실수(mistake), 규칙위반(violation)이 있다. 과실은 일상적인 오류, 망각(또는 건망증)은 순간적인 기억 실패로 인해 나타난 것, 조작 실수는 지식의 부족이나 부정확한 지식으로 인해 발생된 것, 규칙위반은 규정이나 절차를 알고도 위반하여 발생한 것을 뜻한다. 인적 오류는 정의와 분류를 통해서 보편적인 현상에 해당한다는 것을 알 수 있다. 이러한 인적 오류에 의해서 발생된 결함을 방지하기 위한 노력은 오류의 발생 자체를 줄이고, 오류를 사전에 식별하여 회복할 수 있다. 특히, 항공기 결함에 영향을 미치는 인적 오류는 제작하는 항공사의 특성에 따른 차이를 보이기 때문에, 분석 도구를 활용한 인적 오류 분석이 필요하다[2].

군수품은 연구개발 및 양산단계 때 전문가들의 품질보증활동을 통해 품질 및 신뢰성을 확보한다. 품질보증활동은 품질 요구사항을 확인하여 적절한 품질 기준과 운영상의 정의가 적용되고 있음을 보장하는 활동으로, 품질보증활동 중 5M1E를 적용한 프로세스 검토를 수행할 수 있다[3]. 프로세스 검토는 제조 및 생산 프로세스 대상을 확인하는 활동으로, 적절한 제품이 생산되었거나, 생산될 것이라는 확인 수단으로 활용하고 있다. 5M1E는 인적 자원(man or person or human), 자재(material), 기계(machine), 방법(method), 측정(measurement), 환경(environment)으로 구성된다. 이 중 인적 자원에 대한 프로세스 검토는 인적 오류로 인해 발생하는 결함을 확인할 수 있는 목적을 가진다.

인적 오류 예측에 대한 방법론은 HAZOP(human error hazard and operability study), THERP(technique for human error rate prediction), HEART(human error assessment and reduction technique) 등 다양하다[4]. 인적 오류를 감소하기 위한 방법들은 인적 오류 인식, 인적 오류 정량화, 인적 오류 예방에 초점을 맞추고 있다. 이러한 방법 중, HEART는 최근 안전, 신뢰성, 품질 보증 관점에서 연구 중인 인적 신뢰성 분석(Human Reliability Analysis)기법 중 하나로서, 산업 전반적인 영역에서 쉽게 사용 가능하다.

HEART를 사용하여 인적 오류를 분석한 연구 논문은 다음과 같다. Kirwan[5]은 HEART의 기반이 되는 연구 동향을 확인하고, 인간 신뢰성 평가에 초점을 맞춰서 인적 오류의 가능성을 계산할 수 있으면 오류 감소 분석(Error Reduction Analysis, 이하 ERA)에 의해 오류의 가능성을 감소할 수 있다고 하였다. Akyuz 등[6]은 해상 안전 분석을 위해서 HEART를 기반으로 HFACS(human factors analysis and classification system), AHP(analytic hierarchy process)를 적용한 연구를 수행하였다. Sezer 등[7]은 HEART와 Dempster-Shafer 증거이론을 이용하여 해양 승선작동에 대한 안전성을 확인하였다. 또한, 결과는 CREAM(cognitive reliability and error analysis method)을 통해 도출된 결과와 비교하여 인적 오류를 확인하였다. HEART에 대한 선행 연구들을 통해서 국내 군수품 중 회전익 항공기에 대한 인적 오류의 정량적인 분석을 적용한 사례는 적은 것으로 나타났다. 품질보증활동 관점에서 적절한 방법론을 적용하는 것은 필요하다. HEART의 인자 중 평가된 영향의 비율은 적절한 방법론을 적용하여 정량적인 수치를 결정하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 유사 집합 모델을 선택하였고, 유사 집합 모델을 사용한 연구 동향은 다음과 같다. Yazdi 등[8]은 항공기 착륙장치에 대해서 FMEA(failure mode and effects analysis)와 유사 집합법(similarity aggregation method)을 통해 위험도를 도출하였다. Yin 등[9]은 천연가스 탱크에 대해 유사 집합법과 퍼지 고장 나무 모델(fault tree analysis)을 적용하여 전문가의 가중치를 도출하고 위험 우선순위를 확인하였다.

본 논문에서는 인적 오류 예측에 대한 방법론 중 HEART를 사용하였고, 회전익 항공기 유압계통의 3가지 업무에 대해 인적 오류 평가를 확인하였다. HEART의 결과는 인적 오류 가능성(Human Error Probability, 이하 HEP)으로 나타낼 수 있다. HEART의 인자 중 하나인 평가된 영향의 비율은 퍼지 이론을 기반으로 전문가의 의견을 반영할 수 있다.

2. 본론

2.1 퍼지 이론

퍼지 이론은 모호하거나 불확실한 상태를 정량적으로 표현할 수 있는 이론 중 하나이다[10]. 퍼지 이론은 0 또는 1로 구성된 특성 함수에 의해 크리스프 집합(crisp

set)을 소속도 함수(memberhip function)를 이용하여 퍼지 집합(fuzzy set)으로 변환한다. Eq. (1)과 Fig. 1은 삼각형 소속도 함수를 나타낸 것이다.

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & a_3 < x \end{cases} \quad (1)$$

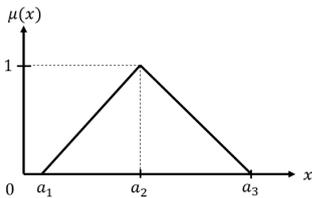


Fig. 1. Membership function of triangular form

언어 변수는 적절한 퍼지 함수로 표현할 수 있는데, 본 논문에서는 5가지 언어 변수로 구성하였다.

Fig. 2는 소속도 함수를 나타낸 것이고, Table 1은 수준에 따른 삼각형 소속도 함수에서 퍼지 수를 나타낸 것이다.

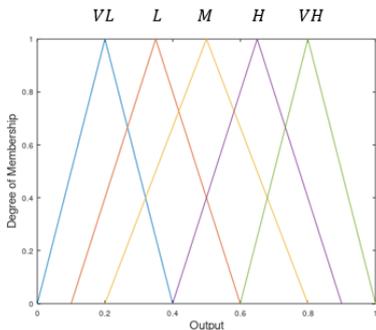


Fig. 2. Graph of membership function

Table 1. Fuzzy numbers of triangular form

Level	a1	a2	a3
Very Low(VL)	0	0.2	0.4
Low(L)	0.1	0.35	0.6
Medium(M)	0.2	0.5	0.8
High(H)	0.4	0.65	0.9
Very High(VH)	0.6	0.8	1

2.2 HEART

HEART는 작업자 오류 분석과 감소 기술로 J.C Williams[11]에 의해 개발되었다. HEART는 업무 수행에 대한 오류의 가능성과 영향에 대한 확률을 원칙을 기초로 한다. HEART는 작업 영역에 대한 전문가의 지식과 경험을 이용한 이론으로 변수인 일반 업무 유형(Generic Task Type, 이하 GTT), 오류 공정 조건(Error Producing Condition, 이하 EPC), 평가된 영향의 비율(Assessed Proportion Of Affect, 이하 APOA)로 구성한다. 여기서, 일반 업무 유형(GTT)은 9개의 일반 오류 확률(Generic Error Probability, 이하 GEP)로 구성한다. Table 2는 9개의 일반 업무 유형에 대한 일반 오류 확률을 나타낸 것이다.

Table 2. Description of Generic Task Type(GTT) and related Generic Error Probability(GEP) value

ID	GGT	GEP
A	Totally unfamiliar, performed at speed with no real idea of the likely consequence	0.55
B	Shift or restore system to a new or original state on a single attempt without supervision or procedures	0.26
C	Complex task requiring a high level of comprehension and skill	0.16
D	Fairly simple task performed rapidly or given scant attention	0.09
E	Routine, highly practiced, and rapid task involving a relatively low skill level	0.02
F	Restore of shift the system to an original or new state following procedures, with some checking	0.003
G	Completely familiar, well-designed, highly practiced, and routine task occurring several times per hour, performed to the highest possible standards by highly motivated, highly trained and experienced persons, totally aware of the implications of failure and having the time to correct potential errors but without the benefits provided by significant job aids	0.0004
H	Respond correctly to system commands even when there is an augmented or automated supervisory system providing an accurate interpretation of the system state	0.00002
M	Miscellaneous task for which no description can be found	0.03

오류 공정 조건(Error Producing Condition, 이하 EPC)은 38개로 작업 영역에서 오류 조건의 가능성을 정량적인 수치로 구성한다. Table 3은 38개의 오류 공정 조건에 대해 정량적인 수치를 나타낸 것이다.

Table 3. EPC definition and related maximum value

CODE	EPC	Max. value
EPC1	Unfamiliarity (Unfamiliarity with a situation which is potentially)	17
EPC2	Time shortage (A shortage of time available for error detection and correction)	11
EPC3	A low signal-noise ratio	10
EPC4	Features over-ride allowed (A means of suppressing or over-riding information or features which is too easily accessible)	9
EPC5	Spatial and functional incompatibility (No means of conveying spatial and functional information to operators in a form which they can readily assimilate)	8
EPC6	Model mismatch (A mismatch between an operator's model of the world and that imagined by a designer)	8
EPC7	No Obvious means of reversing an unintended action	8
EPC8	Channel overload (A channel capacity overload, particularly one caused by simultaneous presentation of no redundant information)	6
EPC9	Technique unlearning (A need to unlearn a technique and apply one which requires the application of an opposing philosophy)	6
EPC10	Knowledge transfer (The need to transfer specific knowledge from task to task without loss)	5.5
EPC11	Performance ambiguity (Ambiguity in the required performance standards)	5
EPC12	Misperception of risk (A mismatch between perceived and real risk)	4
EPC13	Poor feedback (Poor, ambiguous or ill-matched system feedback)	4
EPC14	Delayed/incomplete feedback (No clear direct and timely confirmation of an intended action from the portion of the system over which control is to be exerted)	4
EPC15	Operator inexperience (Operator inexperience (e.g. a newly-qualified tradesman, but not an "expert"))	3
EPC16	Impoverished information (An impoverished quality of information conveyed by procedures and person/person interaction)	3
EPC17	Inadequate checking (Little or no independent checking or testing of output)	3
EPC18	Objectives conflict (A conflict between immediate and long-term objectives)	2.5

EPC19	No diversity (No diversity of information input for veracity checks)	2.5
EPC20	Educational mismatch (A mismatch between the educational achievement level of an individual and the requirements of the task)	2
EPC21	Dangerous incentives (An incentive to use other more dangerous procedures)	2
EPC22	Lack of exercise (Little opportunity to exercise mind and body outside the immediate confines of a job)	1.8
EPC23	Unreliable instrumentation (enough that it is noticed)	1.6
EPC24	Absolute judgements required (A need for absolute judgments which are beyond the capabilities or experience of an operator)	1.6
EPC25	Unclear allocation of function and responsibility	1.6
EPC26	Progress tracking lack (No obvious way to keep track of progress during an activity)	1.4
EPC27	Physical capabilities (A danger that finite physical capabilities will be exceeded)	1.4
EPC28	Low meaning (Little or no intrinsic meaning in a task)	1.4
EPC29	High-level emotional stress	1.3
EPC30	ill-health (Evidence of ill-health amongst operatives, especially fever)	1.2
EPC31	Low workforce morale	1.2
EPC32	Inconsistency of meaning of displays and procedures	1.2
EPC33	Poor environment (A poor or hostile environment (below 75% of health or life-threatening severity))	1.15
EPC34	Low mental workload (Prolonged inactivity or highly repetitious cycling of low mental workload tasks (for 1st half hour))	1.1
EPC35	Sleep cycles disruption (Disruption of normal work-sleep cycles)	1.1
EPC36	Task pacing (Task pacing caused by the intervention of others)	1.06
EPC37	Supernumeraries (Additional team members over and above those necessary to perform task normally and satisfactorily (per additional man))	1.03
EPC38	Age (Age of personnel performing perceptual tasks)	1.02

HEART 방법론의 결과인 인적 오류 확률(HEP)은 인간 신뢰도 평가(human reliability assessments, 이하 HRA)의 결과로, APOA, EPC, 가중치를 통해 도출한다.

Eq. (2)는 APOA와 EPC를 통해 결정된 가중치인 WF를 계산한 것이다. Eq. (3)은 GEP와 WF를 통해 결정된 인적 오류 확률을 나타낸 것이다.

$$WF_i = APOA_i \times (EPC_i - 1) + 1, \quad (2)$$

for $i = 1, 2, \dots, n; n \leq 38$

Where, WF denotes weight factor for HEART.

$$HEP = GEP \times \prod_{i=1}^{38} WF_i \quad (3)$$

HEP는 인간 신뢰성 분석과 인간 신뢰성 기술 측면에서 유용하게 사용할 수 있는 요소 중 하나로 본 논문에서 사용되었다.

2.3 유사 집합 모델

앞서 언급된 모든 EPC는 인적 오류 확률을 고려해야 한다. EPC의 요소 중 평가된 영향의 비율인 APOA는 0과 1 사이의 값으로 구성되며, 신뢰성 있는 전문가의 의견을 종합하여 도출한다. 전문가의 의견을 종합하는 방법은 최대-최소 Delphi법, 산술 평균, 투표, 퍼지 관계 등 다양하다. Hsu 등은 다중 의사 결정을 다루기 위해서 유사 집합 모델을 제시하였다[12]. 제시된 모델은 퍼지 이론을 이용하여 전문가의 의견을 정량적으로 도출하는 방법이다. 유사 집합 모델은 전문가의 특성을 해당 전문가의 직위, 경력, 교육 수준으로 구성할 수 있다. Table 4는 전문가의 특성에 따른 점수를 나타낸 것이다.

Table 4. Traits for expert weighting score

Score	Position	Experience	Education
3	Researcher	< 3	Bachelor
4	Junior Researcher	< 4	Master
5	Senior Researcher	< 5	Ph.D

본 논문에서 전문가는 3명($E_k (k = 1, 2, 3)$)으로 구성하였고, 3명의 전문가에 대한 직위, 경력, 교육 별 점수 및 가중치는 Table 5와 같다. Eq. (4)는 전문가에 대한 가중치를 나타낸 것이다.

Table 5. Expert weighting results

Expert	Position	Experience	Education	Sum	Weight (W)
E1	4	4	4	12	0.36
E2	3	4	4	11	0.33
E3	3	3	4	10	0.30

$$w_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Where, w_i denotes weight of experts.

Eq. (5)는 전문가의 의견에 대한 일치정도를 나타낸 것으로, 가중치를 도출할 수 있다.

$$S(\bar{R}_i, \bar{R}_j) = \frac{\int_x (\min\{\mu_{\bar{R}_i}(x), \mu_{\bar{R}_j}(x)\}) dx}{\int_x (\max\{\mu_{\bar{R}_i}(x), \mu_{\bar{R}_j}(x)\}) dx} \quad (5)$$

Where, \bar{R} denotes opinion of an expert.

Fig. 3은 퍼지 이론의 삼각 소속도 함수에서 두 의견에 대한 집합을 도식적으로 나타낸 것이다. 전문가 1명의 의견은 삼각 소속도 1개로 나타내며, 각 전문가의 중첩된 의견은 소속도 함수의 교차(intersection)로 표현하며, 전체 면적과 교차된 면적을 활용하여 정량적인 값을 나타낼 수 있다.

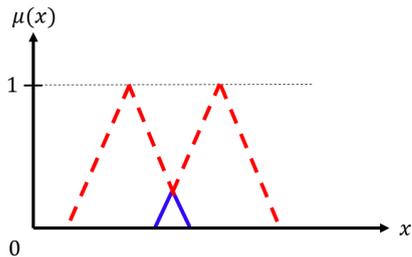


Fig. 3. Intersection of expert opinion

유사 집합 모델은 전문가의 일치정도, 전문가의 평균 일치정도, 전문가의 상대 일치정도로 구성한다. Eq. (6)은 전문가의 일치정도($S_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$)를 매트릭스 형태로 나타낸 것이다.

$$SAM = \begin{bmatrix} 1 & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{n1} \\ S_{21} & 1 & S_{23} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Where, S denotes similarity measure function.

Eq. (7)은 전문가들의 평균 일치 정도(Average Agreement Degree, 이하 AAD)를 나타낸 것이다.

$$AAD(E_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n S_{ij} \quad (7)$$

Where, $AAD(E_i)$ denotes average agreement degree of expert $E_i (i = 1, 2, \dots, n)$

Eq. (8)은 전문가들의 상대 일치 정도(Relative Agreement Degree, 이하 RAD)를 나타낸 것이다.

$$RAD_i = \frac{AAD(E_i)}{\sum_{i=1}^n AAD(E_i)} \quad (8)$$

Where, RAD_i denotes relative agreement degree of expert $E_i (i = 1, 2, \dots, n)$

Eq. (9)는 일치 정도 계수(Consensus Degree Coefficients, 이하 CDC)를 나타낸 것이다.

$$CDC_i = \beta_S \cdot w_i + (1 - \beta_S) \cdot RAD_i \quad (0 \leq \beta_S \leq 1) \quad (9)$$

Where, CDC_i denotes consensus degree coefficients of expert $E_i (i = 1, 2, \dots, n)$

일치 정도 계수는 전문가의 의견과 일치 정도에 대한 가중치(β_S)를 부여하여 도출할 수 있다. 전문가의 의견과 일치 정도에 대한 가중치는 0과 1 사이의 값으로 부여한다. 0은 전문가의 의견에 대한 가중치를 부여하지 않는 것이고, 1은 전문가의 일치 정도를 무시하고 전문가의 가중치만 고려하는 것이다. 일반적으로 전문가의 의견과 일치 정도에 대한 가중치는 0.5로 설정한다.

Eq. (10)은 전문가 의견에 대해서 결과를 일치 정도 계수, 전문가 의견 등을 통해 나타낸 것이다.

$$\widetilde{R}_A = CDC(E_1) \otimes \widetilde{R}_1 \otimes \dots \otimes CDC(E_m) \otimes \widetilde{R}_M \quad (10)$$

여기서, \otimes 는 퍼지 수 더하기, \circledast 는 퍼지 수 곱하기를 나타낸 것이다. 본 논문에서 전문가 의견 결과는 APOA 로 설정하였다.

3. 사례 연구

3.1 회전익 항공기 유압계통

회전익 항공기의 유압계통은 작동유에 압력을 가하여 기계적인 에너지를 압력 에너지로 변환시키는 계통이다. 유압계통은 주 유압펌프와 비상 유압펌프, 트랜스퍼 모듈(transfer module), 작동기(actuator), 매니폴드(manifold) 등으로 구성한다. 주 유압펌프는 유압유를 특정 압력으로 승압하는 역할을 하며, 트랜스퍼 모듈로 공급한다. 비상 유압펌프는 별도의 저장조가 없으며 주 유압펌프로부터 유압유를 공급받는다. 트랜스퍼 모듈은 저장조가 장착되어 있으며, 저장조에 유압유를 저장한다. 유압유는 연결관을 통해 펌프로 유입되며, 가압 된 유압은 압력필터와 각종 밸브를 거쳐 구동기로 보내지고, 다시 연결관을 통해 밸브와 필터를 거친 후 저장 용기로 돌아오는 과정을 반복한다. 유압 저장조는 과한 압력 및 파열을 방지하며 밸브 외부에 장착된 수동레버를 통해 저장조 내부의 유압유와 공기를 배출할 수 있다.

Fig. 4는 회전익 항공기의 유압계통에 대한 구성품을 나타낸 것이다.

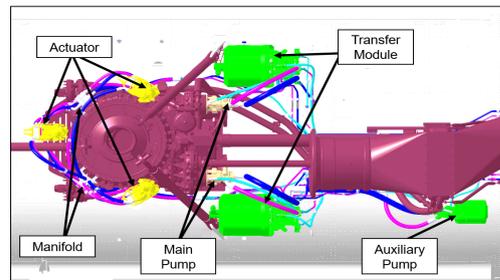


Fig. 4. Rotorcraft hydraulic system

Table 6은 여러 가지 유압계통의 공정 중 사례 연구를 위해 3가지 공정을 나타낸 것이다. 3가지 공정은 인적 오류가 자주 발생하는 장비 설치, 연결관 연결, 오일 채우기로 선정하였다.

Table 6. Task for rotorcraft hydraulic system

Task		GGT
1	Install with machine	G
2	Nozzle connect	G
3	Fill the oil	G

Table 7은 선정된 공정에 대한 오류 공정 조건인 EPC를 나타낸 것이다. EPC는 각 공정에 대해 3개씩 선정하였다.

Table 7. Detailed EPC for rotorcraft hydraulic system

Subtask	No.	EPC No.	EPC
1	1.1	EPC4	Features over-ride allowed
	1.2	EPC8	Channel overload
	1.3	EPC12	Misperception of risk
2	2.1	EPC2	Time shortage
	2.2	EPC6	Model mismatch
	2.3	EPC9	Technique unlearning
3	3.1	EPC12	Misperception of risk
	3.2	EPC15	Operator inexperience
	3.3	EPC31	Low workforce morale

3.2 HEART 분석

Table 8은 HEART 분석을 통한 결과를 나타낸 것이다. 전문가 3명에 대한 가중치는 Table 4에서 확인할 수 있고, 전문가 3명은 각 공정에 대해 5가지 정도(level)를 이용하여 결정하였다.

Table 8. Expert's opinion of EPC

No.	EPC Value	E1	E2	E3
1.1	9	VL	VL	L
1.2	6	L	L	L
1.3	4	VL	L	L
2.1	11	M	L	M
2.2	8	M	M	M
2.3	6	M	H	M
3.1	4	L	M	M
3.2	3	M	M	L
3.3	1.2	M	M	H

예시는 공정 1.1에 대해서 유사 집합 모델을 적용한 것이다. 여기서, 가중치(β_j)는 0.5로 설정하였다.

Eq. (11)은 Table 1을 이용하여 3명의 전문가 의견에 대한 퍼지 출력 값을 나타낸 것이다. 이때, \tilde{R}_1 은 VL, \tilde{R}_2 는 VL, \tilde{R}_3 는 L에 대한 퍼지 출력 값을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_1 &= (0,0.2,0.4), \tilde{R}_2 = (0,0.2,0.4), \\ \tilde{R}_3 &= (0.1,0.35,0.6) \end{aligned} \quad (11)$$

Eq. (12)는 Eq. (5)를 이용하여 3명의 전문가 의견에 대한 일치정도를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} S(\tilde{R}_1, \tilde{R}_2) &= S(\tilde{R}_2, \tilde{R}_1) = 1 \\ S(\tilde{R}_2, \tilde{R}_3) &= S(\tilde{R}_3, \tilde{R}_2) = 0.29 \\ S(\tilde{R}_3, \tilde{R}_1) &= S(\tilde{R}_1, \tilde{R}_3) = 0.29 \end{aligned} \quad (12)$$

Eq. (13)은 Eq. (6)을 이용하여 3명의 전문가 의견에 대한 일치정도를 매트릭스 형태로 나타낸 것이다.

$$SAM = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.29 \\ 1 & 1 & 0.29 \\ 0.29 & 0.29 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Eq. (14)는 Eq. (7), (8)을 이용하여 상대 일치 정도를 계산한 것이다.

$$\begin{aligned} RAD_1 &= 0.64 / (0.64 + 0.64 + 0.29) = 0.41 \\ RAD_2 &= 0.64 / (0.64 + 0.64 + 0.29) = 0.41 \\ RAD_3 &= 0.29 / (0.64 + 0.64 + 0.29) = 0.18 \end{aligned} \quad (14)$$

Eq. (15)는 Eq. (9)를 이용하여 일치 정도 계수를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} CDC_1 &= 0.5 \cdot 0.36 + (1 - 0.5) \cdot 0.41 = 0.38 \\ CDC_2 &= 0.5 \cdot 0.25 + (1 - 0.5) \cdot 0.41 = 0.33 \\ CDC_3 &= 0.5 \cdot 0.39 + (1 - 0.5) \cdot 0.18 = 0.29 \end{aligned} \quad (15)$$

Eq. (16)은 Eq. (10)을 이용하여 전문가 의견에 대한 최종 결과를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_A &\approx 0.38 \otimes (0, 0.2, 0.4) \oplus 0.33 \otimes (0, 0.2, 0.4) \\ &\oplus 0.29 \otimes (0.1, 0.35, 0.6) \approx (0.03, 0.24, 0.46) \\ &- 0.24 \end{aligned} \quad (16)$$

Table 9는 공정 1 ~ 3에 대한 WF를 통해 인적 오류

확률인 HEP를 도출한 것이다. 도출된 인적 오류 확률인 HEP은 클수록 인적 오류를 발생할 확률이 높은 것으로 판단할 수 있다. 유압계통에 대한 인적 오류 확률 영향이 큰 공정은 연결관 연결이며, 장비 설치, 오일 채우기 순으로 확인할 수 있다.

Table 9. Human error probability of tasks

Subtask	No.	APOA	WF	GGT	HEP
1	1.1	0.24	2.92	0.004	0.0030
	1.2	0.35	2.75		
	1.3	0.31	1.93		
2	2.1	0.47	5.7	0.004	0.0055
	2.2	0.50	4.5		
	2.3	0.53	3.65		
3	3.1	0.46	2.38	0.004	0.0022
	3.2	0.45	1.9		
	3.3	0.55	1.11		

Table 10은 Kumar 등이 연구한 결과를 나타낸 것이다. 본 논문에서의 결과는 Kumar 등이 연구한 LPG 주유소에서 연료 보급 공정에 대한 인적 오류 확률의 결과와 유사하다[13].

Table 10. HEART result applied in an LPG refueling station

Activity	Rank
Stall the vehicle with right position	3
Connect the nozzle	1
Fill the tank with fuel	2
Disconnect the nozzle	4

4. 결론

본 논문은 군수품 품질보증활동에서 프로세스 검토 중 인적 오류로 인해 발생하는 결함을 확인하기 위한 방법론을 제시한 것이다. 또한, 항공기 사고 요인 가운데 70~80%는 인적 오류로 인해 발생했다는 점에서 정량적 수치를 확인하기 위한 연구를 진행하였다. 제시된 방법론은 인적 오류 분석을 쉽고, 논리적으로 확인하기 위해서 퍼지 이론을 바탕으로 기존 HEART와 유사 집합 모델을 결합하였다. 방법론의 검증은 위해 임의로 군수품 중 회전익 항공기의 유압계통 3가지 공정을 사례 연구로 제시하였다. 유압계통 3가지 공정은 제작 공정에서 인적

오류를 발생할 수 있는 장비 설치, 연결관 연결, 오일 채우기 공정을 선정하였고, 다음 각 공정에 대해서 38개의 EPC 중 3개씩 선정하였다. 인적 오류 확률은 높은 순서로 연결관 연결, 장비 설치, 오일 채우기로 확인할 수 있고, 이를 통해 인적 오류 검토 대상에 대한 우선순위를 결정할 수 있다.

국내에서 인적 오류에 대한 연구는 인적 오류 감소를 위한 정책, 인적 오류 유발 요인별 감소 방안, 인식 확인 등으로 국한되어 있기에 국외 연구와 같이 여러 방법론을 적용하여 정량적인 수치를 확인하는 노력이 필요하다고 사료 된다. 본 연구의 한계점은 회전익 항공기의 유압계통으로 한정된 점과 3가지의 공정만 선택한 점이다. 3가지의 공정만 선택한 이유는 현재까지 회전익 항공기 공정에 대한 인적 오류 분석 논문이 적고, 타 논문의 유사한 공정으로 결과를 비교하기 위함이다.

본 연구에서 제시한 방법론을 위험별, 공정별로 더욱 다양화하고 세분화하면 항공기 분야에서 인적 오류를 감소하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] J. Y. Choi, K. S. Cha, "The study to factors induced human error", THE KJAsEM, Vol.12, No.4, pp.196-202, 2002.
- [2] Y. G. Kim, Y. C. Choi, H. M. Yang, "A study on the detailed classification and empirical analysis of human error", The Korean Society for Aviation and Aeronautics, Vol.10, No.1, pp.9-20, 2002.
- [3] 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>
- [4] M. Butlewski, M. Jasiulewicz-Kaczmarek, A. Misztal, M. Slawinska, *Safety and Reliability : Methodology and Applications, Design methods of reducing human error in practice*, p.2455, CRC Press, 2014, pp.1101-1106. DOI: <http://dx.doi.org/10.1201/b17399-154>
- [5] B. Kirwan, "Human error identification techniques for risk assessment of high risk systems - part 1 : review and evaluation of techniques", *Applied Ergonomics*, Vol.29, No.3, pp.157-177, Jan. 1998. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0003-6870\(98\)00010-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-6870(98)00010-6)
- [6] E. Akyuz, M. Celik, S. Cebi, "A phase of comprehensive research to determine marine-specific

EPC values in human error assessment and reduction technique", *Safety Science*, Vol.87, No.1, pp.63-75, March 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.013>

- [7] S. I. Sezer, E. Akyuz, O. Arslan, "An extended HEART Dempster-Shafer evidence theory approach to assess human reliability for the gas freeing process on chemical tankers", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.220, No.1, Article 108275, Dec. 2021.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108275>
- [8] M. Yazdi, S. Daneshvar, H. Setareh, "An Extension to Fuzzy Developed Failure Mode and Effects Analysis (FDFMEA) Application for Aircraft Landing System", *Safety Science*, Vol.98, pp.113-123, June 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2017.06.009>
- [9] H. Yin, C. Liu, W. Wu, K. Song, D. Liu, Y. Dan, "Safety assessment of natural gas storage tank using similarity aggregation method based fuzzy fault tree analysis (SAM-FFTA) approach", Vol.66, No.1, Article 104159, May 2020.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104159>
- [10] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and control*, Vol.8, pp.338-353, Nov. 1965.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/2.53>
- [11] J. C. Williams, "A data based method for assessing and reducing human error to improve operational performance", *Human factors and Power Plants, Conference Record for 1988 IEEE Fourth Conference on. IEEE Xplore*, pp.436-450, 1988.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/HFPP.1988.27540>
- [12] H.M. Hsu, C.T. Chen, "Aggregation of Fuzzy Opinions under Group Decision Making", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.79, pp.279-285, 1996.
DOI: [http://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00185-9](http://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00185-9)
- [13] A. M. Kumar, S. Rajakarunakaran, V. A. Prabhu, "Application of Fuzzy HEART and expert elicitation for quantifying human error probability in LPG refuelling station, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.48, No.1, pp.186-198, April 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.021>

나 성 현(Seong-Hyeon Na)

[정회원]



- 2017년 2월 : 충남대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 9월 ~ 2019년 12월 : 국방과학연구소 연구원
- 2019년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

품질경영, 기계공학, 항공공학, 신뢰성공학

박 연 등(Yeon-Dong Park)

[정회원]



- 2012년 2월 : 세종대학교 디지털콘텐츠학과 (공학학사)
- 2012년 4월 ~ 2014년 4월 : 하만코리아 사원
- 2014년 3월 ~ 2019년 6월 : 마그네티마렐리 대리
- 2019년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

소프트웨어 테스트, 소프트웨어 공학