

증거 이론 및 그레이 시스템 이론을 이용한 회전익 항공기 유압계통의 위험 우선순위 평가

나성현*, 구정모, 이광은
국방기술품질원

Risk Priority Number Evaluation of Rotorcraft Hydraulic System Using Evidence Theory and Grey System Theory

Seong-Hyeon Na*, Jeong-Mo Koo, Gwang-Eun Lee
Defense Agency for Technology and Quality

요약 군수품은 품질보증활동과 관련하여 위험 식별 및 영향 평가가 필요하다. 위험 식별은 다양한 자료를 통해 도출되며, 위험 평가는 위험 관리를 기반으로 FMEA(고장모드 영향분석)를 통해 수행한다. FMEA는 군수품의 품질을 확보하기 위해 고장, 결함 등에 대한 검토 및 결정하는 접근방법이다. FMEA는 체계의 안전성을 강화하기 위한 중요한 기술이지만, 심각도, 발생도, 검출도에 대해서 전문가의 의견을 바탕으로 RPN을 결정하기 때문에 객관적인 평가가 필요하다. 이러한 단점을 해결하기 위해, FMEA은 Dempster-Shafer가 제안한 증거 이론과 그레이 시스템의 이론 적용이 필요하다. 증거 이론은 결합 규칙을 사용하여 전문가의 의견을 종합한다. 증거 이론은 누적 확률을 기반으로 믿음 함수와 개연성 함수를 사용한다. 그레이 시스템 이론은 전문가의 개별 의견에 대해서 결과를 도출한다. 그레이 시스템 이론은 소속도 함수를 통해 그레이 관계 계수, 그레이 관계도를 도출하며, 관계 도출에 따라 우선순위를 결정한다. 본 논문에서는 새로운 방법을 적용한 FMEA를 회전익 항공기 유압계통에 적용하였고, 위험 우선순위를 도출하였다. 결론은 불확실한 정보를 보여주는 유용한 방법론으로 증거 이론과 그레이 시스템 이론을 FMEA에 적용할 것을 제시한다.

Abstract Munitions require risk identification and effect analysis in quality assurance. Risk identification is derived from various data, and risk analysis is conducted using FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) based on risk management. FMEA is an approach to review and determine the failures and defects to ensure the quality of munitions. In addition, FMEA is an important technique that is used to enhance the safety of complex systems. Nevertheless, an objective evaluation is needed to determine the opinions of experts and the risk priority number (RPN) based on the severity, occurrence, and detectability. A novel FMEA using Dempster-Shafer(D-S) evidence theory and grey system theory is proposed. Evidence theory is the aggregation of the opinion of experts using combination rules. In addition, evidence theory uses a belief and plausibility function based on the cumulative probability. Grey system theory aims to measure the relative influence of experts. The grey system theory estimates the grey relational coefficient, which is prioritized according to the relative projection. A novel FMEA was developed to demonstrate the rotorcraft hydraulic system with risk priorities. The results suggest that evidence theory and grey system theory provide valuable methodologies for displaying uncertain information in FMEA.

Keywords : FMEA, Rotorcraft, Evidence Theory, Grey System Theory, RPN

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

email: coolnac@naver.com

Received March 29, 2021

Accepted July 2, 2021

Revised April 20, 2021

Published July 31, 2021

1. 서론

군수품은 연구개발 및 양산단계별로 사용자의 요구조건에 대한 부합 여부 확인을 위해, 품질보증활동을 실시해야 한다. 품질보증활동은 위험 식별 및 평가에 따라 위험과 관련된 품목에 대해 품질관리를 수행하는 것이다. 위험 식별 및 평가는 계약문서, 연구 개발자료, 기술자료 등을 통해 식별된 위험 발생 가능성과 사용자의 안전 또는 성능에 미치는 위험 영향에 따라 등급, 우선순위를 분류하는 활동이다. 고장모드 영향분석(FMEA: Failure Mode and Effects Analysis, 이하 FMEA)은 위험 식별 및 평가를 위해 수행하는 방법 중 하나이다. 기존 FMEA는 심각도, 발생도, 검출도에 대한 가중치를 설정하지 않고, 위험도를 도출한다. 즉, FMEA의 단점은 등급, 우선순위를 선정할 때 객관성과 타당성을 확보하기 어렵다는 것이다[1].

국내외 많은 연구자는 방법론이 적용된 FMEA로 단점을 극복하고 있다. Dempster-Shafer가 제안한 증거 이론(Evidence Theory)은 개별적인 증거에 의한 확신 정도를 서로 배타적인 가설 집합으로 구성하여 의견을 종합하는 방법론이다[2,3]. 그레이 시스템 이론(GST: Grey System Theory, 이하 GST)은 정보, 사용법, 기구, 구조 등에 대한 불확실하고 열악한 정보에 대한 객관성 확보에 이용하는 방법론이다[4]. 증거 이론과 그레이 시스템 이론은 평가자의 주관적인 의견을 정량화하기 때문에 FMEA에 적용하면 기존 FMEA의 단점을 줄이고, 국내 군수품 위험 식별 및 평가를 통한 품질관리 방법론에 대한 더 나은 방향을 제시할 수 있다.

본 논문에서는 군수품 중 회전의 항공기 유압계통에 대해 증거 이론과 그레이 시스템 이론을 적용하여 개선된 FMEA를 수행하였다. 개선된 FMEA를 통해 도출된 위험 우선순위를 유압계통의 개발 및 양산단계의 품질보증활동에서 활용할 수 있는 기본 자료로 활용하고자 한다.

2. 본론

2.1 선행 연구 고찰

증거 이론과 그레이 시스템 이론을 적용한 국외 선행 연구는 다음과 같다. Wang 등은 증거 이론을 트랜스미션의 가스 절연 개폐 장치에 적용하여 결과를 도출하는 방법을 제시하였다[5]. Emovon 등은 증거 이론과

Electre 방법을 사용하여 합정 디젤 엔진의 위험 요소를 분석하였다[6]. Tang은 증거 이론과 그레이 시스템 이론을 이용하여 퍼지 집합을 통한 결정 방법을 제시하였다[7]. Table 1은 참고문헌[5-7]의 내용을 나타낸 것이다. 참고문헌[5-7]은 기존 FMEA에 다양한 방법론을 적용하여 객관성을 확보하였다. 본 논문에서는 이를 통해 군수품 위험 관리에서 쉽게 적용할 수 있는 방법론을 제시하고자 하였다.

Table 1. Details of literatures

Approach	Details
FMEA	<ul style="list-style-type: none"> Simple rank to RPN in ascending order Without considering different importance between risk factors
Wang[5]	<ul style="list-style-type: none"> FMEA approach based on D-S theory and TOPSIS method The weight of the distance are not taken into consideration in TOPSIS method.
Emovon[6]	<ul style="list-style-type: none"> FMEA approach based on D-S theory and Electre method Need to complicated two indices(net superior and inferior values) for Electre method
Tang[7]	<ul style="list-style-type: none"> FMEA approach based on D-S theory and grey system theory In combination rule, the aggregation results may be improper.

2.2 FMEA

FMEA는 품질에 관련된 위험 관리를 수행할 때 사용하는 방법으로 다수의 고장모드(FM: Failure Mode)에 대한 위험 우선순위를 결정하고 이를 통해 품질 관리를 할 수 있다. FMEA는 위험 발생 시 해결 정도인 심각도(severity), 위험 발생 가능성인 발생도(occurrence), 검출 정도인 검출도(detectability)를 통해 결과를 나타낸다. 위험도(RPN: Risk Priority Number, 이하 RPN)는 Eq. (1)과 같다.

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

Where, S denotes severity, O denotes occurrence, D denotes detectability.

Table 2는 MIL-STD-882를 활용하여 리커트 척도 5점으로 설정한 심각도, 발생도, 검출도의 언어 표현을 나타낸 것이다[8].

Table 2. Linguistic expressions of ranking criterion

	Level	Category	Description
S	L1	Very low	Safety
	L2	Low	Not serious injury
	L3	Medium	Minor injury
	L4	High	Severe injury
	L5	Very High	Death or system loss
O	L1	Very low	1:100
	L2	Low	1:50
	L3	Medium	1:20
	L4	High	1:10
	L5	Very High	1:2
D	L1	Very low	Unlikely
	L2	Low	Remote
	L3	Medium	Moderate
	L4	High	Probable
	L5	Very High	Frequent

2.3 Dempster-Sharfer 증거 이론

증거 이론은 불확실한 가설에 대한 확신 정도를 직관적으로 병합하여 신뢰구간으로 표현하는 방법이다. 신뢰구간을 통한 신뢰도는 믿음 함수와 가능성 함수를 통해 누적 확률로서 표현한다. 또한, 증거 이론은 확률이론과 같이 배타적인 가설 집합을 설정한다. 가설 집합은 n 개의 원소로 구성할 때 2^n 개의 부분집합을 가지며, Eq. (2)와 같이 2^n 개의 부분집합으로 구성된 집합을 θ 의 멱집합(power set)이라고 한다.

$$2^\theta = \left\{ \emptyset, \{\theta_1\}, \dots, \{\theta_N\}, \{\theta_1, \theta_2\}, \dots, \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i\}, \dots, \theta \right\} \quad (2)$$

Where, θ denotes frame of discernment, 2^θ denotes power set

증거 이론에서 멱집합에 할당된 가중치는 기본 확률 배정 함수로 표현하며, 개별증거에 의해 부분집합이 지원 받는 정도를 나타낸다. 여기서, 함수 $m(A)$ 는 Eq. (3)과 같이 나타낸다.

$$\sum_{A \in 2^\theta} m(A) = 1, m(A) : 2^\theta \rightarrow [0, 1] \quad (3)$$

Where, m denotes basic probability assignment, A denotes hypothesis

증거 이론에서 확실성은 구간으로 표현되고, 구간은 믿음 함수(Bel: Belief Function)와 개연성 함수(Pl: Plausibility Function)로 구성한다. 믿음 함수는 Eq. (4)로 표현하며, 기본 확률 배정에 의한 함수로서 하나의 사건이 반드시 일어나는 확률이고, 개연성 함수는 Eq. (5)로 표현하며 믿음 함수에 의해 부정되지 않는 정도를 나타낸다.

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (4)$$

Where, B denotes event

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B) \quad (5)$$

Where, \bar{A} denotes complementary set of A

Fig. 1은 믿음 함수와 개연성 함수에 대한 관계를 도식적으로 나타낸 것이다. 증거 이론은 Dempster에 의해 제안된 결합 규칙을 적용하여 서로 다른 정보의 확실성을 병합한다. 결합 규칙은 Eq. (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$m(A) = (m_i \oplus m_j)(A) \quad (6)$$

$$= \begin{cases} 0 & , A = \emptyset \\ \frac{\sum_{B \cap C = A} (m_i(B) \times m_j(C))}{1 - \sum_{B \cap C = \emptyset} (m_i(B) \times m_j(C))} & , A \neq \emptyset \end{cases}$$

믿음 함수와 개연성 함수는 RPN과 임계 RPN을 통해 Eq. (7)과 같은 조건을 가진다.

$$\begin{aligned} Bel(E) &= Bel(RPN > RPN^*) \\ &= 1 - Pl(RPN < RPN^*) \\ Pl(E) &= Pl(RPN > RPN^*) \\ &= 1 - Bel(RPN < RPN^*) \end{aligned} \quad (7)$$

Where, RPN^* denotes threshold RPN

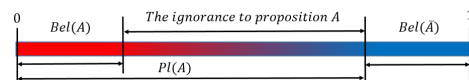


Fig. 1. Information in evidence theory

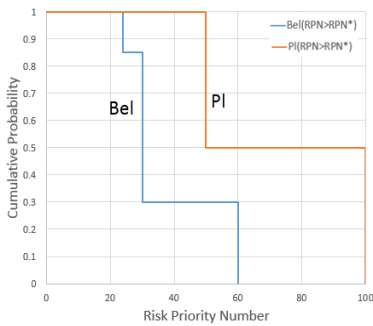


Fig. 2. Example of belief and plausibility functions

Fig. 2는 믿음 함수와 개연성 함수의 그래프를 나타낸 것이다. 그래프의 X축은 임계 RPN을 나타낸 것이고, Y축은 신뢰도를 누적 확률로 나타낸 것이다. 임계 RPN은 믿음 함수와 개연성 함수의 그래프를 통해 결정할 수 있다. 본 논문에서 신뢰도는 0.9로 설정하였다. 증거 이론을 통한 RPN을 도출하는 방법은 먼저 PI의 신뢰도가 0.9일 때 임계 RPN을 파악하고, 그 다음 X축 값에 대응하는 Bel의 신뢰도를 도출하여 그 값을 활용할 수 있다.

2.4 그레이 시스템 이론

그레이 시스템 이론은 FMEA의 심각도, 발생도, 검출도에 대한 소속도 함수(membership function)를 크리스프(crisp) 값으로 변화하는 방법이다.

Fig. 3은 언어 변수에 대한 소속도 함수를 나타낸 것이다. 크리스프 값($K(x)$)은 Eq. (8)과 같이 소속도 함수의 X축의 최솟값(c)과 최댓값(d)을 이용하여 도출할 수 있다.

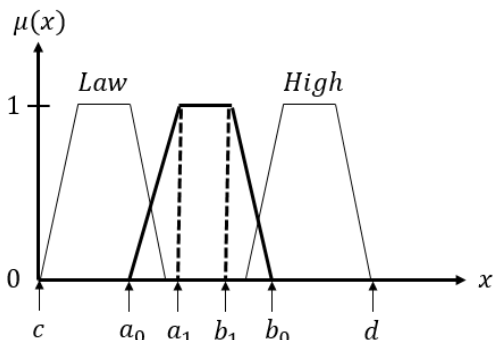


Fig. 3. Graph of membership function for GST

$$K(x) = \frac{(b_0 - c) + (b_1 - c)}{((b_0 - c) + (b_1 - c)) - ((a_0 - d) + (a_1 - d))} \quad (8)$$

Where, a_0, a_1, b_0, b_1, c, d denote parameters for GST

Table 3-4는 회전의 항공기 유압계통의 그레이 시스템 이론을 적용한 FMEA를 통해, 5개의 위험 수준에 따른 Eq. (8)의 파라미터를 정리한 것이다. Table 3은 FMEA에서 심각도에 대한 Eq. (8)의 파라미터이고, Table 4는 발생도와 검출도에 대한 Eq. (8)의 파라미터이다. 심각도는 전문가 3명에 대해서 각각 다른 소속도 함수를 사용하였고, 발생도와 검출도는 객관적인 데이터를 활용할 수 있어서, 같은 소속도 함수를 사용하였다. Fig. 4는 상용 프로그램인 엑셀(excel)을 이용하여 심각도에 대한 소속도 함수를 나타낸 것이다[9]. 크리스프 값은 최댓값을 통해 각 항목의 값을 표준화한다. 표준화된 값은 Eq. (9)와 같이 그레이 관계 계수로 표현한다. ζ 는 최솟값과 최댓값의 정도를 나타내는 특징 계수로서 0.5를 사용한다.

Table 3. Membership function parameter for severity

Severity	c	a_0	a_1	b_1	b_0	d	$k(x)$	
E1	L1	0	1	1.5	2.5	3	10	0.24
	L2	0	2	3	4	5	10	0.38
	L3	0	4	5	7	7	10	0.54
	L4	0	6	7	8	9	10	0.71
	L5	0	8	8.5	9.5	10	10	0.85
E2	L1	0	1	2	3	4	10	0.29
	L2	0	2	3	4	5	10	0.38
	L3	0	4	5	6	7	10	0.54
	L4	0	6	7	8	9	10	0.71
	L5	0	7	8	9	10	10	0.79
E3	L1	0	1	2	2	3	10	0.25
	L2	0	3	4	4	5	10	0.41
	L3	0	5	6	6	7	10	0.59
	L4	0	7	8	8	9	10	0.77
	L5	0	9	9.5	9.5	10	10	0.93

Table 4. Membership function parameter for occurrence, detectability

Occurrence Detectability	c	a_0	a_1	b_1	b_0	d	$k(x)$	
E1	L1	0	2	2	2	2	10	0.20
	L2	0	4	4	4	4	10	0.40
E2	L3	0	6	6	6	6	10	0.60
E3	L4	0	8	8	8	8	10	0.80
	L5	0	10	10	10	10	10	1.00

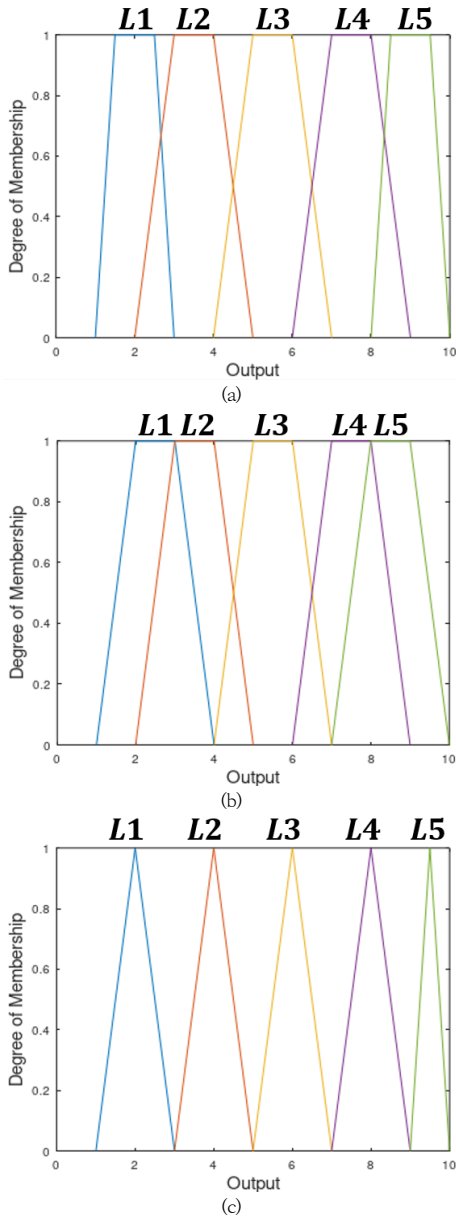


Fig. 4. Input membership function of severity for experts
(a) Expert 1 (b) Expert 2 (c) Expert 3

$$Y_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_{0j} - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}|}{|x_{0j} - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}|}$$

($\zeta \in (0,1)$), ($i = 1,2,\dots,m$), ($j = S,O,D$)

(9)

Where, Y_{ij} denotes grey relational coefficient, ζ denotes distinguishing coefficient

상관도는 Eq. (10)과 같이 나타내며, 그레이 관계 계수와 가중계수를 통해 도출할 수 있다. 상관도는 FMEA에서 잠재적인 영향을 분석하고, 수치가 작을수록 우선순위가 높아진다.

$$\Gamma = \sum_{i=1}^m \beta_{G,j} Y_{ij}, (j = S, O, D) \quad (10)$$

Where, Γ denotes degree of relation, $\beta_{G,j}$ denotes grey weight coefficient.

2.5 제안된 방법

제안된 방법은 Fig. 5와 같은 4가지 단계로 진행된다. 1단계, 문제를 결정한다. 2단계, 심각도, 발생도, 검출도를 결정한다. 3단계, 증거 이론을 이용하여 전문가 종합 의견에 대해 정량화된 값을 도출한다. 4단계, 그레이 시스템 이론을 이용하여 전문가 개별 의견을 분석하고 결과를 도출한다. Fig. 6은 제안된 방법의 구성도를 나타낸 것이다.

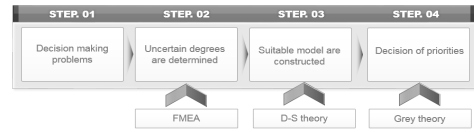


Fig. 5. Flow diagram of proposed methodology

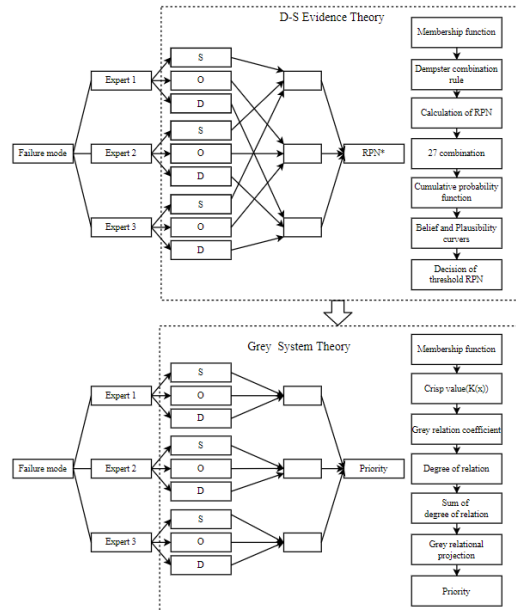


Fig. 6. Block diagram of proposed methodology

선행 연구와 비교 시, 기존 그레이 시스템 이론에서 기존 긍정과 부정 기준은 소속도 함수에서 최솟값인 0과 최댓값인 10을 이용한다[10]. 본 논문에서 제안된 그레이 시스템 이론의 긍정 및 부정 기준은 범위에 대한 오차를 줄이기 위해 x_{0j} 집합의 최솟값 및 최댓값을 이용하였고, 이는 Eq. (11-12)와 같다.

$$Y_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |x_{0j}^+ - x_{ij}^+| + \zeta \max_i \max_j |x_{0j}^+ - x_{ij}^+|}{|x_{0j}^+ - x_{ij}^+| + \zeta \max_i \max_j |x_{0j}^+ - x_{ij}^+|}$$

, ($\zeta \in (0,1)$), ($j = S, O, D$)

$$x_{0j}^+ = \max_j (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) \quad (11)$$

Where, Y_{ij}^+ denotes grey positive relational coefficient, x_{0j}^+ denotes positive reference sequence

$$Y_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |x_{0j}^- - x_{ij}^-| + \zeta \max_i \max_j |x_{0j}^- - x_{ij}^-|}{|x_{0j}^- - x_{ij}^-| + \zeta \max_i \max_j |x_{0j}^- - x_{ij}^-|}$$

, ($\zeta \in (0,1)$), ($j = S, O, D$)

$$x_{0j}^- = \min_j (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) \quad (12)$$

Where, Y_{ij}^- denotes grey negative relational coefficient, x_{0j}^- denotes positive reference sequence

$$\Gamma^+ = \sum_{i=1}^m \beta_j Y_{ij}^+, (j = S, O, D) \quad (13)$$

$$\Gamma^- = \sum_{i=1}^m \beta_j Y_{ij}^-, (j = S, O, D)$$

Where, Γ^+ denotes degree of positive relation, Γ^- denotes degree of negative relation

긍정 도출 값(P_i^+)과 부정 도출 값(P_i^-)은 Eq. (14)와 같이 정의할 수 있다.

$$P_i^+ = \sum Y_{ij}^+, (j = S, O, D) \quad (14)$$

$$P_i^- = \sum Y_{ij}^-, (j = S, O, D)$$

Where, P_i^+ denotes positive projection, P_i^- denotes degree of negative projection

그레이 상관 도출 값은 Eq. (15)와 같이 그레이 수의 긍정 기준과 부정 기준을 통해 나타내며, 높을수록 고장 모드의 영향이 낮다.

$$R_i = \frac{P_i^+}{P_i^+ + P_i^-} \quad (15)$$

Where, R_i denotes grey relational projection

3. 사례 연구

3.1 회전익 항공기 유압계통 FMEA

회전익 항공기의 유압계통은 Fig. 7과 같으며 비행조종에 필요한 동력을 제공하는 것 외에도 제동장치와 같은 부가 기능장치에 동력을 공급한다. 유압 펌프는 회전익 항공기의 유압유를 정상 작동하는 기능을 가진다. 유압 펌프는 Fig. 8과 같이 주 유압펌프 2개와 비상 유압펌프로 구성된다.

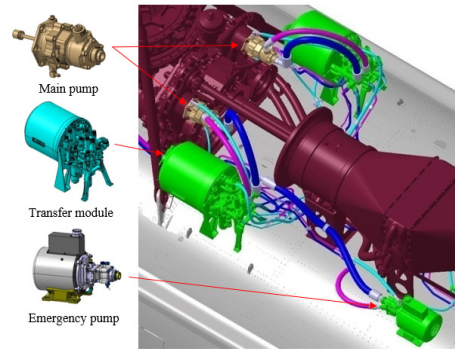


Fig. 7. Graphics of rotorcraft hydraulic system

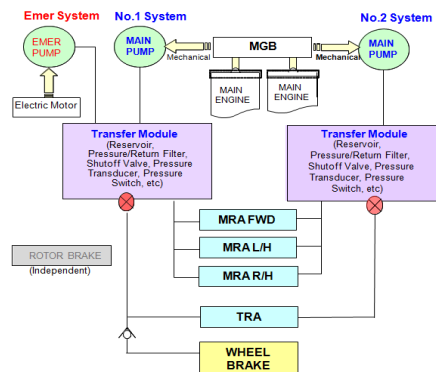


Fig. 8. Diagram of rotorcraft hydraulic system

Table 5는 유압계통의 5가지 고장모드를 나타낸 것이다. Table 6은 3명의 전문가에 의해 분석된 심각도, 발생도, 검출도의 위험 수준을 나타낸 것이다.

Table 5. FMEA for rotorcraft hydraulic system

Failure mode	
FM1	Inoperable breakaway valve
FM2	Leakage of oil
FM3	Malfunction of emergency pump
FM4	Damage of transfer module
FM5	Damage of main pump

Table 6. Detailed FMEA for rotorcraft hydraulic system

Expert	Failure mode	S	O	D
E1	FM1	L1	L2	L1
	FM2	L2	L2	L2
	FM3	L3	L2	L1
	FM4	L4	L2	L1
	FM5	L5	L1	L1
E2	FM1	L1	L2	L2
	FM2	L3	L2	L2
	FM3	L3	L1	L1
	FM4	L5	L1	L1
	FM5	L5	L2	L1
E3	FM1	L2	L2	L2
	FM2	L2	L2	L2
	FM3	L2	L2	L2
	FM4	L4	L2	L1
	FM5	L5	L1	L1

3.2 증거 이론을 이용한 분석

Fig. 9는 심각도, 발생도, 검출도에 대한 각각의 소속도 함수를 이용하여 믿음 함수와 개연성 함수 그래프를 표현한 것이다[11].

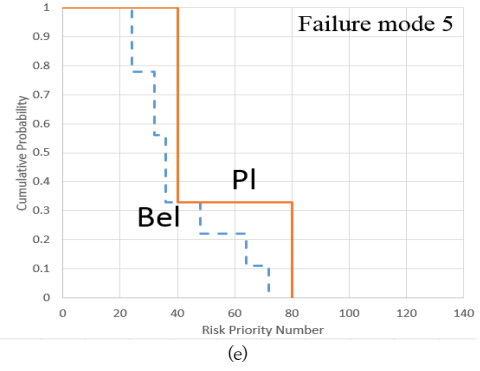
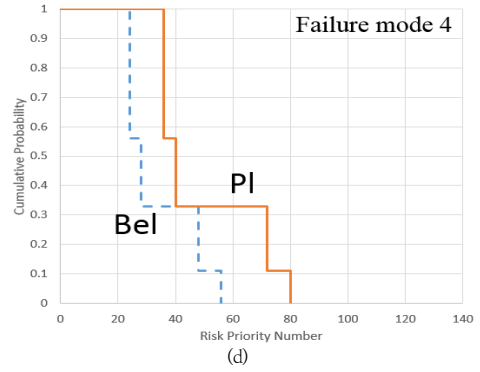
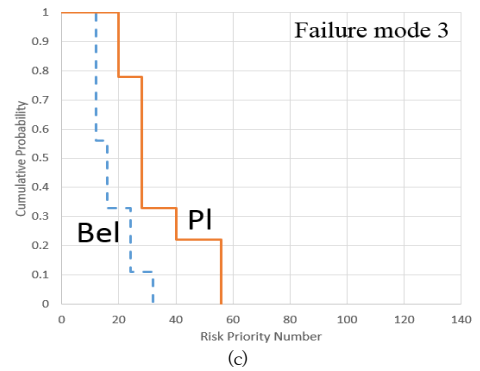
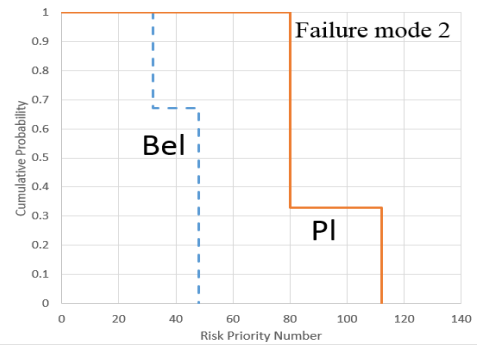
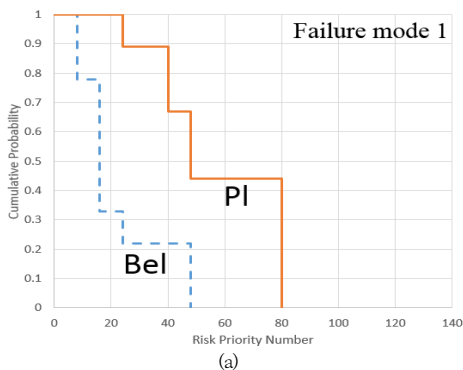


Fig. 9. Belief and plausibility curves of failure modes (a) FM1 (b) FM2 (c) FM3 (d) FM4 (e) FM5

Table 7은 증거 이론을 통한 우선순위 결과를 나타낸 것이다. 위험 우선순위는 FM2, FM5, FM4, FM1, FM3 순으로 도출되었다.

Table 7. Priorities of FMEA using evidence theory

Failure mode	RPN*	Bel	Pl	Priority
FM1	24	0.33	0.9	4
FM2	80	-	-	1
FM3	20	0.33	0.9	5
FM4	36	0.33	0.9	3
FM5	40	0.33	0.9	2

Table 8. Tabular representation of risk level for GST

Risk		S	O	D
E1	L1	0.17	0.20	0.20
	L2	0.32	0.40	0.40
	L3	0.50	0.60	0.60
	L4	0.68	0.80	0.80
	L5	0.83	1.00	1.00
E2	L1	0.23	0.20	0.20
	L2	0.32	0.40	0.40
	L3	0.50	0.60	0.60
	L4	0.68	0.80	0.80
	L5	0.77	1.00	1.00
E3	L1	0.25	0.20	0.20
	L2	0.35	0.40	0.40
	L3	0.55	0.60	0.60
	L4	0.75	0.80	0.80
	L5	0.92	1.00	1.00

Table 9. Tabular representation of crisp values for GST

$K(x)$		S	O	D
E1	FM1	0.17	0.40	0.20
	FM2	0.32	0.40	0.40
	FM3	0.50	0.40	0.20
	FM4	0.68	0.40	0.20
	FM5	0.83	0.20	0.20
E2	FM1	0.17	0.40	0.40
	FM2	0.32	0.40	0.40
	FM3	0.50	0.20	0.20
	FM4	0.68	0.20	0.20
	FM5	0.83	0.40	0.20
E3	FM1	0.23	0.40	0.40
	FM2	0.50	0.40	0.40
	FM3	0.50	0.40	0.40
	FM4	0.77	0.40	0.20
	FM5	0.77	0.20	0.20

3.3 그레이 시스템 이론을 이용한 분석

그레이 시스템 이론(GST)은 심각도, 발생도, 검출도에 대한 각각의 소속도 함수를 활용하였다[10].

Table 8은 그레이 시스템 이론을 적용하기 위해 위험 수준에 따른 크리스프 값을 정리한 것이고, Table 9는 3명의 전문가가 분석한 위험 수준에 대한 크리스프 값을 정리하여 나타낸 것이다. Table 10-11은 각각 고장모드 1~5에 대한 심각도, 발생도, 검출도의 그레이 긍정 관계 계수와 그레이 부정 관계 계수를 정리한 것이다.

Table 10. Tabular representation of positive reference sequence for GST

Y^+		S	O	D
E1	FM1	1.00	0.63	1.00
	FM2	0.69	0.63	0.63
	FM3	0.50	0.63	1.00
	FM4	0.39	0.63	1.00
	FM5	0.33	1.00	1.00
E2	FM1	1.00	0.58	0.58
	FM2	0.50	0.58	0.58
	FM3	0.50	1.00	1.00
	FM4	0.33	1.00	1.00
	FM5	0.33	0.58	1.00
E3	FM1	1.00	0.59	0.59
	FM2	1.00	0.59	0.59
	FM3	1.00	0.59	0.59
	FM4	0.42	0.59	1.00
	FM5	0.33	1.00	1.00

Table 11. Tabular representation of negative reference sequence for GST

Y^-		S	O	D
E1	FM1	0.33	1.00	0.63
	FM2	0.39	1.00	1.00
	FM3	0.50	1.00	0.63
	FM4	0.69	1.00	0.63
	FM5	1.00	0.63	0.63
E2	FM1	0.33	1.00	1.00
	FM2	0.50	1.00	1.00
	FM3	0.50	0.58	0.58
	FM4	1.00	0.58	0.58
	FM5	1.00	1.00	0.58
E3	FM1	0.33	1.00	1.00
	FM2	0.33	1.00	1.00
	FM3	0.33	1.00	1.00
	FM4	0.63	1.00	0.59
	FM5	1.00	0.59	0.59

Table 12는 심각도, 발생도, 검출도의 가중계수 $\beta_{G,j}$ 가 각각 0.33, 0.33, 0.33일 때 우선순위를 나타낸 것이다.

Table 12. Priorities of FMEA using GST

FM	S		O		D		R	Priority
	Γ^+	Γ^-	Γ^+	Γ^-	Γ^+	Γ^-		
FM1	0.87	0.65	0.71	0.77	0.72	0.77	0.51	4
FM2	0.64	0.79	0.55	0.83	0.72	0.77	0.44	1
FM3	0.70	0.70	0.83	0.55	0.72	0.77	0.53	5
FM4	0.67	0.76	0.77	0.71	0.66	0.73	0.49	3
FM5	0.77	0.74	0.63	0.85	0.77	0.72	0.48	2

Fig. 10은 1:1:1, 4:3:3, 2:2:1, 5:3:2, 2:1:1의 비율로 구성된 $\beta_{G,j}$ 에 대한 우선순위 결과를 정리한 것이다.

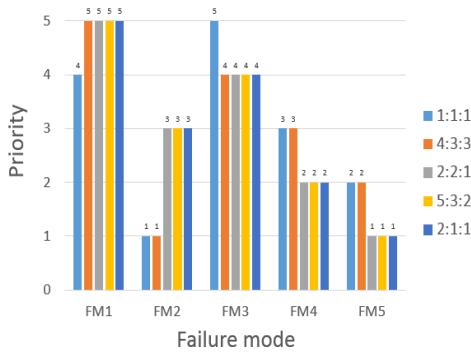


Fig. 10. Comparison of priorities for variable $\beta_{G,j}$

3.4 우선순위 비교

증거 이론을 통해 도출된 우선순위는 FM3, FM1, FM4, FM5, FM2 순으로 위험 우선순위를 나타내었다. 그레이 시스템 이론에서 동일 우선순위는 심각도, 발생도, 검출도의 가중계수의 비율이 1:1:1로 도출되는 부분에서 확인할 수 있다. Table 13은 기존 FMEA와 제안된 방법으로 도출된 결과를 나타낸 것이다. 이때, 기존 FMEA의 위험 수준은 상수로 고려하여 위험도를 도출하였다. 기존 FMEA를 통한 위험 우선순위는 전문가의 의견에 따라 결정되기 때문에 객관성이 부족할 수 있다. 제안된 방법을 통한 위험 우선순위는 전문가의 의견을 종합하는 결론을 도출하였기 때문에 기존 방법 대비 더 유의미한 자료로 활용할 수 있다.

Table 13. Priorities of FMEA using GST

FM	Priority for FMEA			Priority for novel FMEA
	Expert 1	Expert 2	Expert 3	
FM1	5	4	1	4
FM2	1	1	1	1
FM3	3	5	1	5
FM4	1	3	1	3
FM5	4	2	5	2

4. 결론

본 논문은 군수품 품질보증활동 시, 위험 관리를 위한 적절한 방법론을 적용하였다. 군수품에 대한 품질보증활동은 사용자의 만족도를 보장하고, 개발, 양산 등 총 수명 주기에 걸쳐서 품질관리를 실현한다. 이러한 품질관리는 위험 관리를 기반으로 수행하며, 위험 관리는 위험 식별 및 영향분석, 평가 등을 통해 실시한다. 위험 식별은 군수품에 대한 품질보증활동에 있어서 자료를 수집하고, 위험에 대한 영향을 구체적으로 파악하는 활동이다. 이는 연구 개발자료, 운용 및 피드백 정보 등을 통해 수행한다. 식별된 위험은 FMEA 등의 방법을 통해 위험 발생 가능성과 정도를 정량적으로 결정한다. 기존 FMEA는 전문가의 주관적인 의견이 많이 반영되며, 심각도, 발생도, 검출도에 대한 가중치 변화가 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 Dempster-Sharfer의 증거 이론 및 그레이 시스템 이론을 이용한 FMEA를 통해 심각도, 발생도, 검출도, 전문가 의견에 대해서 가중치를 부여하고, 회전익 항공기 유압계통에 적용한 사례 연구를 통해 위험도인 RPN을 도출하였다. 회전익 항공기 유압계통은 조종계통 및 부가장치에 동력을 공급하는 역할을 한다. 유압계통의 주요 위험 요소는 압력과 누유에 관련된 장비로서 발생도와 검출도는 작지만, 심각도의 영향을 크게 설정해야 한다. 제안된 방법은 증거 이론 및 그레이 시스템 이론을 동시에 적용하는 것으로, 증거 이론은 전문가 3명의 종합된 의견을 하나로 도출하기 위해 사용되었고, 그레이 시스템 이론은 전문가 개별 의견을 통해 위험 우선순위 도출에 사용되었다. 제안된 증거 이론과 그레이 시스템 이론을 통한 FMEA는 위험 우선순위 도출 과정에서 자료로써 활용할 수 있으며, 군수품 품질관리 측면에서 더 유의미한 자료로 활용할 수 있다고 사료 된다.

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, Jan. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.751>
- [2] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications-Chapter 15 Monotone Measures : Belief, Plausibility, Probability, and Possibility*, p.606, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp.530-578
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119994374>
- [3] G. Shafer, "A mathematical theory of evidence turns 40", *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol.79, pp.7-25, July 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijar.2016.07.009>
- [4] J. Deng, "Introduction to grey system theory", *The Journal of Grey System*, Vol.1, pp.1-24, Oct. 1989.
DOI: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/90757.90758>
- [5] Z. Wang, J. M. Gao, R. X. Wang, K. Chen, Z. Y. Gao, "Failure mode and effects analysis using Dempster-Shafer theory and TOPSIS method : Application to the gas insulated metal enclosed transmission line (GIL)", *Applied Soft Computing*, Vol.70, pp.633-647, June 2018.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.015>
- [6] I. Emovon, "Failure mode and effects analysis of ship systems using an integrated Dempster Shafer theory and electre method", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.10, No.1, pp.45-60, June 2016.
DOI: <https://jamt.utem.edu.my/jamt/article/view/651>
- [7] H. Tang, "A novel fuzzy soft set approach in decision making based on grey relational analysis and Dempster-Shafer theory of evidence", *Applied Soft Computing*, Vol.31, pp.317-325, Mar. 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.015>
- [8] Department of Defense, MIL-STD-882E System Safety, 2012.
- [9] Z. Li, F. Xiao, L. Fei, S. Mahadevan, Y. Deng, "An evidential failure mode and effects analysis using linguistic terms", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol.33, No. 5, pp.993-1010, Oct. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.2075>
- [10] A. Certa, F. Hoppps, R. Inghilleri, C. M. L. Fata, "A Dempster-Shafer theory based approach to the failure mode, effects and criticality analysis(FMECA) under epistemic uncertainty : application to the propulsion system of a fishing vessel", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.159, pp.69-79, Oct. 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.018>
- [11] D. Wu, "Supplier selection in a fuzzy group setting : A method using grey related analysis and Dempster-shafer theory", *Expert Systems with Applications*, Vol.36, No.5, pp.8892-8899, July 2009.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.010>

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

구 정 모(Jeong-Mo Koo)

[정회원]



- 2018년 2월 : 경상대학교 항공우주공학과 (공학사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

품질경영, 항공공학, 항공기구조, 복합재료

이 광 은(Gwang-Eun Lee)

[정회원]



- 2019년 2월 : 경상대학교 기계항공공학부 항공우주공학 (공학석사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

품질경영, 항공공학, 항공기구조, 복합재료