

# Dempster-Shafer 증거 이론을 이용한 회전익 항공기 착륙장치의 FMEA

나성현<sup>1\*</sup>, 소희섭<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국방기술품질원, <sup>2</sup>육군본부 기획관리참모부

## FMEA for rotorcraft landing system using Dempster-Shafer evidence theory

Seong-Hyeon Na<sup>1\*</sup>, Hee-Soup So<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Defense Agency for Technology and Quality

<sup>2</sup>Department of Planning and Management Staff Army Headquarter

**요약** 품질보증활동은 양산단계에서 위험 식별을 기반으로 품질에 영향을 주는 인자를 확인할 수 있다. 위험 식별은 고장 분석을 통해 이루어지며, 회전익 항공기 착륙장치에 대한 고장 분석 방법은 고장 유형 영향 분석(FMEA)으로 선정하였다. FMEA는 고장 유형에 대해서 심각도, 발생도, 검출도에 대한 정보를 결합하여 품질에 영향을 미치는 인자를 확인하는 방법이다. FMEA 결과는 위험도를 통해 고장 우선순위를 결정한다. 하지만 심각도, 발생도, 검출도에 대한 중요도는 동일하게 구성된다. Dempster-Shafer 증거 이론은 경험과 주관의 반영된 의견에 대해서 불확실성 분석을 수행한다. 또한, Dempster-Shafer 증거 이론은 믿음 함수와 개연성 함수를 구성할 수 있으며, 믿음 함수와 개연성 함수를 통해 가설의 믿음 정도, 신뢰도를 확인할 수 있다. 회전익 항공기 착륙장치는 이륙 및 착륙 시 충격을 받는 구성품으로, 양산단계에서 고장 유형을 관리하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 회전익 항공기 착륙장치의 고장 유형에 대한 위험도 분석을 위해 Dempster-Shafer 증거 이론을 이용한 FMEA를 제안하고, 고장 우선순위를 결정한다. 결과는 믿음 함수 및 개연성 함수 곡선을 통해 도출한다.

**Abstract** The quality assurance activities can detect the factors that affect the quality based on risk identification in the course of mass production. Risk identification is conducted with risk analysis, and the risk analysis method for the rotorcraft landing system is selected by failure mode effects analysis (FMEA). FMEA is a method that detects the factors that can affect the product quality by combining severity, occurrence, and detectability. The results of FMEA were prioritized using the risk priority number. On the other hand, these methods have certain shortcomings because the severity, occurrence, detectability are weighted equally. Dempster-Shafer evidence theory can conduct uncertainty analysis for the opinions with personal reflections and subjectivity. Based on the theory, the belief function and the plausibility function can be formed. Moreover, the functions can be utilized to evaluate the belief rate and credibility. The system is exposed to impact during take-off and landing. Therefore, experts should manage failure modes in the course of mass production. In this paper, FMEA based on the Dempster-Shafer evidence theory is discussed to perform risk analysis regarding the failure mode of the rotorcraft landing system. The failure priority was evaluated depending on the factor values. The results were derived using belief and plausibility function graphs.

**Keywords** : Rotorcraft Landing System, FMEA, Dempster-Shafer Evidence Theory, RPN, Belief, Plausibility

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

email: coolnac@naver.com

Received September 25, 2020

Accepted February 5, 2021

Revised November 3, 2020

Published February 28, 2021

### 1. 서론

군수품에 대한 품질보증활동은 위험관리를 기반으로 하며, 위험 식별 및 결과에 따라 군수품 품질에 영향을 주는 인자를 확인한다[1]. 위험 식별은 객관성과 정당성을 확보하기 위해 많은 데이터를 기반으로 관리하고, 위험 유형, 요소 또는 인자를 선정한다. 군수품 중 회전익 항공기는 고장과 밀접한 관련이 있으며, 고장을 관리하는 것은 위험을 예방하는 것과 같다. 고장 관리 방법은 다양한 기법을 이용한다. 품질 데이터를 적절하게 사용할 수 있는 방법은 고장 유형 영향 분석(Failure Mode, Effect and Analysis, 이하 FMEA)이다. FMEA는 회전익 항공기의 개발, 설계, 양산단계에서 사용하는 방법이다. FMEA는 위험도를 산출할 수 있으며, 위험도를 통해 고장 우선순위를 결정한다. FMEA에서 고장 정보는 품질보증원에 의해 계약정보, 제품 및 프로세스 특성, 품질경영 시스템 운영, 과거 이력, 고객 불만 사항 등을 통해 결정한다. 여기서, 품질보증원은 다양한 전공, 경력, 학위, 나이 등을 가지며, 품질보증활동 수행에 있어서 전문지식을 갖추고 있다. FMEA의 단점은 FMEA에서 사용되는 심각도, 발생도, 검출도가 같은 중요성을 고려하여 평가되는 것이다. 고장 유형에 대해 위험도가 같을 경우, 고장 우선순위는 추가적인 검토가 필요하다. 또한, FMEA는 품질보증원의 주관적인 지식이 개입되기 때문에 신뢰성을 확보하기 위한 노력이 필요하다. 국외에서 FMEA의 단점을 극복하기 위해 다양한 이론을 적용하여 연구하고 있다. Dempster-Shafer(이하, D-S) 이론을 적용한 연구는 다음과 같다. Yang 등은 D-S 이론을 사용하여 항공기 터빈 로터 블레이드의 2가지 구성품에 대해서 FMEA를 통해 고장 유형을 선정하고, 고장 유형을 분석한 뒤, 위험도를 평가하였다[2]. Su 등은 항공기 엔진 로터 블레이드에 대해서 D-S 이론을 적용한 FMEA를 수행하였다[3]. Certa 등은 함정 유압 체계에 대해서 D-S 이론을 적용한 FMEA를 수행하였다[4]. Kalathil 등은 LNG 저장 시설에 대해서 D-S 이론을 적용하여 고장 분석을 수행하였다[5]. D-S 이론은 현재 다양한 체계뿐만 아니라 인공지능 분야에서 활발하게 이용되고 있으며, 기존 FMEA의 단점을 극복하는 방법으로 적용 및 연구되고 있다.

본 논문에서는 회전익 항공기 착륙장치에 대해서 D-S 이론을 적용한 FMEA를 수행하였다. D-S FMEA는 개발 단계 시 수행한 결과와의 비교를 통해 양산단계에서 신뢰성 있는 고장 관리 방법으로 구성되었다.

### 2. 본론

#### 2.1 개요

Fig. 1은 D-S FMEA 수행을 위한 흐름도를 나타낸 것이다. 주요 연구 방향은 양산단계에서 군수품의 위험 식별을 FMEA를 통해 위험도를 산출하고 우선순위를 결정하는 것으로 관리한다. 기존 FMEA와 D-S FMEA 결과를 비교하여 우선순위를 비교한다. 개발단계에서 수행한 FMECA는 치명도를 통해 우선순위가 결정된다. FMECA에서 수행한 우선순위는 D-S FMEA 결과의 참고자료로 활용한다.

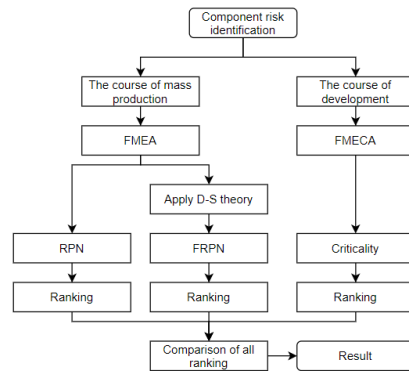


Fig. 1. Flow chart for D-S FMEA

#### 2.2 전문가 구성

군수품 품질보증활동은 품질보증기관인 국방기술품질원에서 주도하고 있으며, 군수품의 개발, 양산, 배치 등 총 수명주기에 대한 품질요구조건을 파악하는 임무를 수행하는 것이다[1]. Table 1은 전문가에 대한 업무, 경력, 학위 등을 나타낸 것이다. 전문가는 품질보증원 총 3명으로 구성하였고, 착륙장치의 고장 유형 식별을 위한 의견을 수립하였다. 착륙장치에 대한 의견은 심각도, 발생도, 검출도에 대한 등급 산출을 위한 설문으로 도출되었다. 등급 산출은 범위로 결정하였다.

Table 1. Criterion for expert selection

	Expert 1	Expert 2	Expert 3
Task	Quality assurance	Quality assurance	Quality assurance
Career	7	5	5
Scholarship	Master degree	Master degree	Master degree
Grade	Research	Research	Research
Position	Quality operator	Quality operator	Quality operator

### 2.3 FMEA

FMEA는 발생 가능한 고장 유형과 영향에 대해서 평가하는 방법으로 고장에 대한 우선순위를 관리할 때 사용한다. FMEA는 심각도(severity), 발생도(occurrence), 검출도(detectability)를 통해 위험도(Risk Priority Number, 이하 RPN)를 평가할 수 있다.

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

Where, S Severity, O Occurrence, D Detectability

심각도, 발생도, 검출도는 MIL-STD-882E에서 제시한 위험 매트릭스를 참고하여 언어적 표현을 제시하였다 [6]. Table 2~4는 각각 심각도, 발생도, 검출도에 대한 등급 및 언어적 표현을 나타낸 것이다. 심각도는 고장이 발생했을 경우 결과에 미치는 영향, 발생도는 잠재된 고장 유형이 발생하는 정도, 검출도는 고장 유형이 발생할 때 검출되는 정도를 나타낸 것이다. 심각도, 발생도, 검출도는 등급 및 점수로 표현할 수 있으며, 전문가에 의해 평가된다.

Table 2. Linguistic expressions for severity

Level	Category	Description
S	1	Very low Safety
	2	Low Not serious injury
	3	Medium Minor injury
	4	High Severe injury
	5	Very High Death or system loss

Table 3. Linguistic expressions for occurrence

Level	Category	Description
O	1	Very low ~1 cases
	2	Low 2~3 cases
	3	Medium 4~6 cases
	4	High 7~8 cases
	5	Very High 9~ cases

Table 4. Linguistic expressions for detectability

Level	Category	Description
D	1	Very low Unlikely
	2	Low Remote
	3	Medium Occasional
	4	High Probable
	5	Very High Frequent

심각도, 발생도, 검출도는 모두 5단계로 등급을 구성하였다. 위험도는 정량적으로 표현된 값으로 클수록 고장

이 자주 발생하고, 고장이 발생하여도 감지하기 어렵고, 해당 고장 유형이 체계에 영향을 크게 미친다는 의미이다. 위험도를 통해 도출된 고장 순위에서, 높은 위험도는 관리를 통해 순위를 낮추어 체계를 관리하는 방법으로 사용한다. FMEA는 체계 개발의 다양한 시험 중 발생된 고장에 의해 유형을 구성하고, 양산단계에서 발견된 고장 개수로 발생도와 검출도를 산출하고, 안전에 관련된 규격을 통해 심각도를 결정한다. 특히, 고장 유형 및 심각도는 검출도, 발생도 대비 중요 관점을 어디에 두냐에 따라 주관적인 의미를 포함한다. 따라서 점수의 신뢰성을 높이기 위해, FMEA는 논리성을 가지고 있는 이론을 적용한다.

### 2.4 회전익 항공기 착륙계통

회전익 항공기는 수요 증가에 따라 고장 발생이 증가하고 있다. 이 중, 착륙계통은 회전익 항공기 이·착륙 시 충격 하중을 흡수하는 역할을 한다. 이 밖에 활주, 제동, 방향전환 등의 지상 운용 및 취급 시 하중을 지지하는 체계이다. 전륜 착륙장치(nose landing system)는 2개의 바퀴가 장착되는 고정식이다. 전륜 착륙장치는 드래그 스테이(drag stay), 피팅(fitting), 기어(gear), 토크 링크(torque link), 휠(wheel), 타이어(tire), 브레이크 시스템 등으로 구성된다. Fig. 2는 전륜 착륙장치 형상을 간략하게 나타낸 것이다[8]. Table 5는 전륜 착륙장치 구성품을 나타낸 것이다.

Table 5. FMEA for landing system

No.	Component	Failure mode
L1	NLG	Gas leakage
L2	NLG	Pin damage
L3	NLG	No shock absorption
L4	NLG-Tire	Nitrogen reduction
L5	Break parking mode	Component blockage

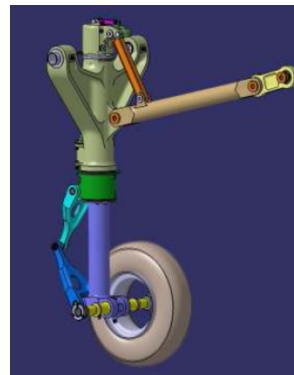


Fig. 2. Nose landing system for rotorcraft

FMEA는 전륜 착륙기어(Nose Landing Gear, 이하 NLG), 타이어, 브레이크에 대해서 진행하였다. 전륜 착륙장치에 대한 고장 유형은 5가지를 선정하여 분석을 진행하였다. 전륜 착륙기어의 고장 유형은 가스 누출, 핀 손상, 충격 흡수 기능 상실, 타이어의 고장 유형은 질소 감소, 브레이크의 고장 유형은 주차 모드 손상으로 선정하였다. FMEA를 진행하기 위해 개발 완료된 회전익 항공기의 고장 유형 치명성 평가(Failure Mode Effects Criticality Analysis, 이하 FMECA) 결과를 참고하였다. FMECA는 치명도 특성에 대한 분석 방법으로, 발생 가능한 영향을 정리하고 분석한다. FMECA는 방위산업에서 주로 활용하며 회전익 항공기 개발단계에서 사용한다. FMECA는 MIL-STD-1629A 규격에 의해 진행되며, 심각도와 치명도를 기반으로 수행한다[7]. 치명도 값은 다음과 같이 계산된다.

$$Cm = \alpha \times \beta \times \lambda_p \times t \quad (2)$$

Where, Cm criticality,  $\alpha$  failure frequency,  $\beta$  failure effect probability,  $\lambda_p$  equivalent failure rate, t time

Table 6. FMECA for landing system

No.	$\alpha$	$\beta$	$\lambda_p$	$Cm$	Rank
L1	x.x	x.x	223	36t	2
L2	x.x	x.x	223	7t	4
L3	x.x	x.x	223	17t	3
L4	x.x	x.x	440	176t	1
L5	x.x	x.x	13	4t	5

Table 6은 개발된 착륙장치의 FMECA 결과를 나타낸 것이다. FMECA 결과 L4-L1-L3-L4-L5 순으로 우선순위를 결정할 수 있다. FMECA는 고장 영향 확률, 고장 유형 비, 고장률을 계산하기 위해서 많은 시험을 수행해야 하는 방법이다.

## 2.5 Dempster-Sharfer 증거 이론

D-S 증거 이론은 Dempster에 의해 제안되고 Shafer에 의해 발전된 이론으로, 불확실한 가설에 대한 확신 정도가 직관적으로 병합되어 구간으로 표현되는 것이다[9]. D-S 증거 이론은 베이즈 확률이론(Bayes's probability theory)의 일반화된 표현으로 다양한 정보로부터 획득한 증거와 확신도(degree of belief)를 직관

적으로 병합할 수 있다. D-S 증거 이론에서 대상의 불확실성 정도는 신뢰구간을 이용해서 표현한다. 이러한 불확실성은 믿음 함수와 가능성 함수를 통해 누적확률분포로서 표현한다. D-S 증거 이론은 확률이론과 같이 배타적인 가설집합(frame of discernment,  $\theta$ )을 설정한다.

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_N\} \quad (3)$$

Where,  $\theta$  frame of discernment

가설집합이  $n$ 개의 원소로 구성할 경우, 가설집합은  $2^n$ 개의 부분집합을 가지며,  $2^n$ 개의 부분집합으로 구성된 집합을  $\theta$ 의 멱집합(power set)이라고 한다.

$$2^\theta = \left\{ \emptyset, \{\theta_1\}, \dots, \{\theta_N\}, \{\theta_1, \theta_2\}, \dots, \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i\}, \dots, \Theta \right\} \quad (4)$$

Where,  $2^\theta$  power set

기본 믿음 배정(basic belief assignment)은 증거 이론의 기본이 된다. 함수  $m(X)$ 는 다음과 같이 나타낸다.  $X$ 는 불확실한 표현 또는 가설을 나타낸 것이다.

$$m(X) : 2^\theta \rightarrow [0, 1] \quad (5)$$

$$m(\emptyset) = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{X \in 2^\theta} m(X) = 1 \quad (7)$$

$$0 \leq m(X) \leq 1 \quad (8)$$

$$X \in 2^\theta \quad (9)$$

D-S 증거 이론에서 확신도는 구간으로 표현되고, 구간은 하나의 사건이 반드시 일어나는 확률인 믿음 함수(belief function, 이하 Bel)와 믿음 함수에 의해 부정되지 않는 정도인 개연성 함수(plausibility function, 이하 Pl)로 구성된다. 믿음 함수는 기본 확률 배정함수에 의해 정의된다.

$$Bel(X) = \sum_{Y \subseteq X} m(Y) \quad (10)$$

$$Bel(\emptyset) = 0 \quad (11)$$

$$Bel(\Theta) = 1 \quad (12)$$

$Y$ 는 사건(event)을 나타낸 것이다. 개연성 함수는 다음과 같이 정의한다.

$$Pl(X) = 1 - Bel(\bar{X}) = \sum_{Y \cap X \neq \emptyset} m(Y) \quad (13)$$

여기서,  $\bar{X}$ 는 가설  $X$ 의 여집합이다. Fig 2는 믿음 함수와 개연성 함수에 대한 관계를 도식으로 나타낸 것이다. 개연성 함수와 믿음 함수에 대한 부정의 합은 1이 된다. 믿음 함수와 개연성 함수는 가설의 믿음 정도에 대한 하한과 상한이다. Fig. 3은 부정확성과 불확실성을 나타낼 수 있다.

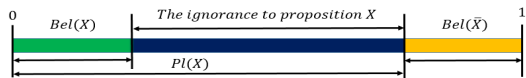


Fig. 3. Belief and Plausibility function

베이즈 확률이론은 가설에 대한 확률이 표현될 때, 가설의 역에 대한 확률이 자동적으로 배정되지만, D-S 증거 이론은 가설을 위한 증거가 가설의 역을 의미하지 않는다.

D-S 증거 이론의 장점은 가설집합에 대해서 가중치를 설정할 수 있는 것이다.

### 2.6 Dempster 결합규칙

D-S 증거 이론은 서로 다른 정보의 확신에 대한 정보를 병합하기 위해 결합규칙을 적용한다[10]. 결합규칙은 Dempster 결합규칙(combination rule)을 이용하였다. Dempster 결합규칙은 전문가들의 서로 다른 의견을 병합하는 장점이 있다.

Dempster 결합규칙은 기초적 가능성 배정(basic probability assignment)을 통해 복합적인 믿음 함수를 결합한다. Dempster 결합 규칙은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m(A) = (m_i \oplus m_j)(A) \quad (14)$$

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

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n \quad (15)$$

$$= (((m_1 \oplus m_2) \oplus \dots) \oplus m_n)$$

### 2.7 D-S FMEA 수행

D-S 증거 이론을 통한 FMEA 방법은 다음과 같다.

- ① 정보 끌어내기
- ② 정보 결합하기
- ③ 고장 유형의 우선순위 결정
- ④ 믿음 함수, 개연성 함수 확인

먼저, 정보를 끌어낸다. 전문가가 고장 유형, 고장 영향, FMEA 분석 결과 등 다양한 정보를 도출할 수 있으며, 고장 유형에 대한 심각도, 발생도, 검출도의 등급, 점수를 구성한다. 다음, 정보를 결합한다. FMEA 분석 결과는 심각도, 발생도, 검출도의 결합으로 표현한다. 심각도, 발생도, 검출도의 결합은 위험도로 표현할 수 있다. 다음, 고장 유형의 우선순위를 결정한다. 위험도는 고장 유형의 우선순위를 결정할 수 있다. 이를 통해 위험도의 한계점을 선정하고, 증거 이론을 통해 도출된 위험도와 비교할 때 사용한다. D-S FMEA는 Excel을 이용하여 수행하였다.

$$E = \{RPN > RPN^*\} \quad (16)$$

Where, E complementary event, RPN\* threshold

다음, 믿음 함수와 개연성 함수를 결정한다. 믿음 함수 및 개연성 함수의 고려할 점은 다음과 같다.

$$Bel(E) \quad (17)$$

$$= Bel(RPN > RPN^*)$$

$$= 1 - Pl(RPN < RPN^*)$$

$$Pl(E) \quad (18)$$

$$= Pl(RPN > RPN^*)$$

$$= 1 - Bel(RPN < RPN^*)$$

이러한 과정은 믿음 함수와 개연성 함수의 그래프를 통해 임계 위험도  $RPN^*$ 를 결정할 수 있다.

### 2.8 착륙계통 D-S FMEA 결과

Table 7~9는 각각 심각도, 발생도, 검출도에 대한 등급을 구간으로 나타낸 것이다. 전문가는 착륙계통의 각 고장 유형에 대해서 심각도, 발생도, 검출도를 5등급으로 구간을 선정하였다.

Table 10은 L1에 대한 27가지 결합에 대해서 나타낸 것이다. L2 ~ L5도 같은 방식으로 위험도를 도출하였다. 전문가 3명의 의견에 대해서  $3^3=27$ 개의 결합을 구성하였다.

Table 7. Expert opinion on severity for landing system

No.	Severity		
	Expert 1	Expert 2	Expert 3
L1	[4 5]	[4 4]	[4 5]
L2	[2 3]	[2 3]	[3 3]
L3	[2 3]	[2 2]	[1 2]
L4	[1 2]	[2 3]	[2 2]
L5	[1 2]	[1 1]	[1 2]

Table 8. Expert opinion on occurrence for landing system

No.	Occurrence		
	Expert 1	Expert 2	Expert 3
L1	[3 4]	[2 3]	[3 3]
L2	[2 3]	[2 2]	[2 3]
L3	[1 2]	[3 4]	[4 4]
L4	[4 4]	[4 4]	[3 4]
L5	[1 2]	[2 3]	[3 3]

Table 9. Expert opinion on detectability for landing system

No.	Detectability		
	Expert 1	Expert 2	Expert 3
L1	[2 3]	[1 2]	[2 2]
L2	[2 3]	[1 1]	[1 2]
L3	[1 2]	[2 3]	[3 3]
L4	[4 5]	[4 4]	[4 5]
L5	[1 2]	[1 2]	[1 1]

Table 10. Combination expert opinion of failure mode L1

No.	Combination			
	S	O	D	RPN
C1	[4 5]	[3 4]	[2 3]	[24 60]
C2	[4 5]	[3 4]	[1 2]	[12 40]
C3	[4 5]	[3 4]	[2 2]	[24 40]
C4	[4 5]	[2 3]	[2 3]	[16 45]
C5	[4 5]	[2 3]	[1 2]	[8 30]
C6	[4 5]	[2 3]	[2 2]	[16 30]
C7	[4 5]	[3 3]	[2 3]	[24 45]
C8	[4 5]	[3 3]	[1 2]	[12 30]
C9	[4 5]	[3 3]	[2 2]	[24 30]
C10	[4 4]	[3 4]	[2 3]	[24 48]
C11	[4 4]	[3 4]	[1 2]	[12 32]

C12	[4 4]	[3 4]	[2 2]	[24 32]
C13	[4 4]	[2 3]	[2 3]	[16 36]
C14	[4 4]	[2 3]	[1 2]	[8 24]
C15	[4 4]	[2 3]	[2 2]	[16 24]
C16	[4 4]	[3 3]	[2 3]	[24 36]
C17	[4 4]	[3 3]	[1 2]	[12 24]
C18	[4 4]	[3 3]	[2 2]	[24 24]
C19	[4 5]	[3 4]	[2 3]	[24 60]
C20	[4 5]	[3 4]	[1 2]	[12 40]
C21	[4 5]	[3 4]	[2 2]	[24 40]
C22	[4 5]	[2 3]	[2 3]	[16 45]
C23	[4 5]	[2 3]	[1 2]	[8 30]
C24	[4 5]	[2 3]	[2 2]	[16 30]
C25	[4 5]	[3 3]	[2 3]	[24 45]
C26	[4 5]	[3 3]	[1 2]	[12 30]
C27	[4 5]	[3 3]	[2 2]	[24 30]

Fig. 4~8은 각 고장 유형에 대한 믿음 함수와 개연성 함수를 나타낸 것이다. 그래프에서 X축은  $RPN > RPN^*$ 을 나타낸 것이고, Y축은 0~1로 구성된 신뢰도(credibility)를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 전문 착륙기어의 고장 유형 중 가스 누출(L1)에 대한  $E = \{RPN > RPN^*\}$ 인 믿음 함수와 개연성 함수의 곡선을 나타낸 것이다. 신뢰도는 0.9로 선정하였고,  $RPN^*$ 은 Y축 값이 0.9일 때 개연성 함수 곡선에 대응하는 X축 값을 나타낸 것이다. Fig 4~7도 같은 방식으로  $RPN^*$ 을 선정하였다.

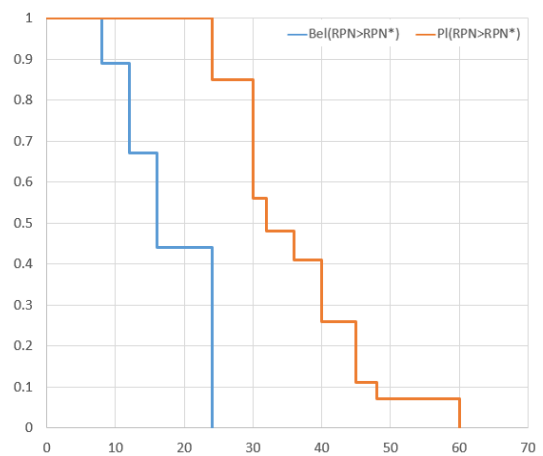


Fig. 4. Belief and Plausibility curve of L1

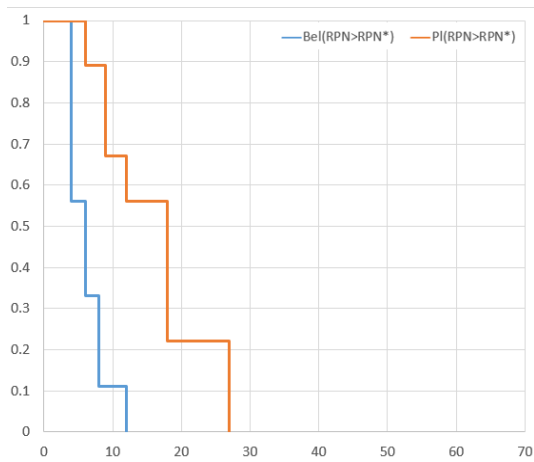


Fig. 5. Belief and Plausibility curve of L2

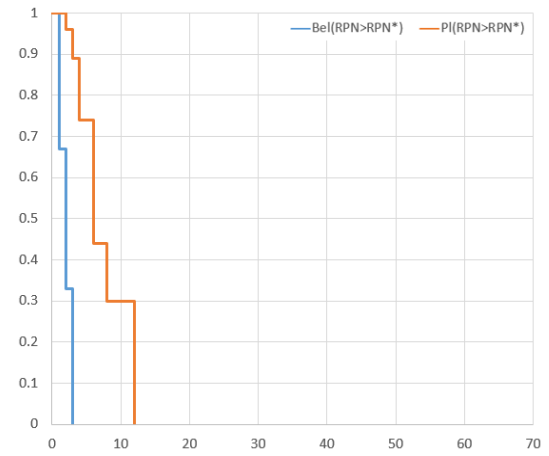


Fig. 8. Belief and Plausibility curve of L5

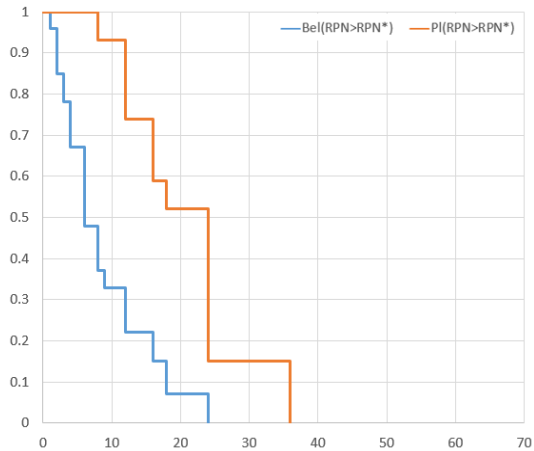


Fig. 6. Belief and Plausibility curve of L3

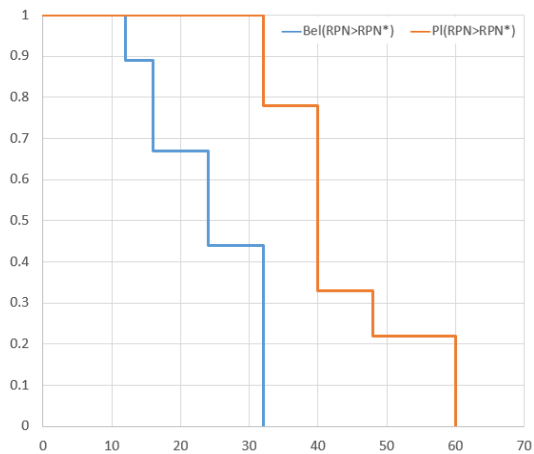


Fig. 7. Belief and Plausibility curve of L4

Table 11은 신뢰도가 0.9일 때,  $RPN^*$ 을 나타낸 것이다. 결과는 L4-L1-L3-L2-L5 순으로 결정되었다. D-S FMEA는 신뢰도 선정에 따라 결과를 확인할 수 있으며, 같은  $RPN^*$ 이 나왔을 경우 믿음 함수가 높을수록 우선 순위를 높게 선정할 수 있다.

Table 12는 FMEA, D-S FMEA, FMECA를 통해 도출한 우선순위 결과를 비교한 것을 나타내 것이다. 현재 주어진 데이터는 동일 결과를 도출하였다.

Table 11. D-S FMEA for landing system

No.	RPN	$RPN^*$	Bel [RPN > $RPN^*$ ]	Pl [RPN > $RPN^*$ ]
L1	[8 24] [24 60]	24	0.45	-
L2	[4 12] [6 27]	6	0.55	-
L3	[1 24] [8 36]	12	0.33	0.9
L4	[12 32] [32 60]	32	0.44	0.9
L5	[1 3] [2 12]	3	0.33	0.9

Table 12. Final ranking for landing system

No.	FMEA Rank	D-S FMEA Rank	FMECA Rank
L1	2	2	2
L2	4	4	4
L3	3	3	3
L4	1	1	1
L5	5	5	5

### 3. 결론

회전익 항공기는 개발 및 양산단계에서 FMEA를 통해 고장 분석을 수행하며 위험 식별 및 관리를 수행한다. FMEA는 심각도, 발생도, 검출도의 중요도가 동일하게 구성되는 단점을 가지고 있어서 신뢰성 확보가 필요하다. D-S 증거 이론은 베이지 확률에 기초로 하여, 불확실성 분석에서 전문가들의 경험과 주관에 따른 의견을 정량화할 수 있다. D-S FMEA는 D-S 증거 이론을 이용하여 FMEA를 수행한 것이다.

회전익 항공기 착륙장치에 대한 D-S FMEA 결과는 고장 유형에 대해서 신뢰도를 선정하여 위험도를 측정하였고, 우선순위를 도출하였다. 전륜 착륙기어의 고장 유형은 가스 누출, 핀 손상, 충격 흡수 기능 상실, 타이어의 고장 유형은 질소 감소, 브레이크의 고장 유형은 주차 모드로 선정하였다. D-S FMEA 결과에 따르면 타이어 질소 감소-전륜 착륙장치 가스 누출-전륜 착륙장치 충격 흡수 기능 손상-핀 손상-주차 모드 손상 순으로 결정되었다. D-S FMEA를 통해 도출된 우선 순위는 FMECA 결과와 비교를 통해 관리를 수행할 수 있다. D-S FMEA는 양산단계에 있는 회전익 항공기에 대한 품질보증활동에서 분석 방법으로 사용 가능할 것으로 사료된다.

### References

- [1] 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>
- [2] J. Yang, H. Z. Huang, L. P. He, S. P. Zhu, D. Wen, "Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using Dempster-Shafer evidence theory under uncertainty", *Engineering Failure Analysis*, Vol.18, pp.2084-2092, June, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.06.014>
- [3] X. Su, Y. Deng, S. Mahadevan, Q. Bao, "An improved method for risk evaluation in failure modes and effects analysis of aircraft engine rotor blades", *Engineering Failure Analysis*, Vol.26, pp.164-174, July, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.009>
- [4] A. Certa, F. Hopps, 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, Feb. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.018>
- [5] M. J. Kalathil, V. R. Renjith, N. R. Augustine, "Failure mode effect and criticality analysis using dempster shafer theory and its comparison with fuzzy failure mode effect and criticality analysis : A case study applied to LNG storage facility", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol.138, pp.337-348, Mar. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.042>
- [6] Department of Defense, MIL-STD-882E System Safety, 2012.
- [7] Depart of Defense, MIL-STD-1629A Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis, 1980.
- [8] M. U. Jang, Y. W. Lee, Y. J. Seo, S. Y. Ji, "The study on improvement about structural integrity of main landing gear for rotorcraft", *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol.20, No.10, pp.459-467, Oct. 2019. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.10.459>
- [9] K. Sentz, S. Ferson, Combination of evidence in Dempster-Shafer theory, Technical Report, Sandia National Laboratories, US, pp.8-34. DOI: <http://dx.doi.org/10.2172/800792>
- [10] J. Dezert, A. Tchamova, "On the behavior of Dempster's rule of combination", Hal-00577983v1, Mar. 2011. DOI: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00577983v1>

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



소 희 섭(Hee-Soup So)

[정회원]



- 1993년 9월 ~ 2014년 1월 : 1항 공여단 공격헬기 교관조종사
- 2019년 2월 : 충남대학교 산업대학원 산업공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 한국형헬기 사업 사업관리

〈관심분야〉

품질경영, 항공공학, 시스템엔지니어링, 신뢰성공학