

## 회전의 항공기 착륙장치에 대한 퍼지 FMEA

나성현\*, 이광은  
국방기술품질원

### Fuzzy FMEA for Rotorcraft Landing System

Seong-Hyeon Na\*, Gwang-Eun Lee  
Defense Agency for Technology and Quality

**요약** 군수품은 품질 보증을 위해 개발과 양산단계에서 위험 식별을 수행해야 한다. 위험 식별은 부품, 구성품, 계통 등에 대한 고장 요소를 분석하는 것으로, 다양한 신뢰성 기법 중에서 고장 모드 영향 분석(FMEA)을 이용하고 있다. FMEA는 위험 식별 중 고장 요인에 대하여 분석하는 방법으로, 위험도(RPN)를 통해 관리할 수 있다. FMEA는 심각도, 발생도, 검출도가 같은 중요도로 평가되기 때문에 단점을 가진다. 퍼지 FMEA는 FMEA의 단점을 보완하기 위해 퍼지 이론을 이용한 것이다. 퍼지 이론은 현상의 불확실한 상태를 표현해주는 방법으로, 정량적인 값을 제공한다. 본 논문에서, 퍼지 FMEA는 회전의 항공기 착륙장치의 고장 모드에 대한 객관적인 평가를 위해 적용되었다. 착륙장치에 대한 위험도 분석을 위해, 퍼지 규칙과 소속 함수를 구성하였다. 퍼지화 모델은 심각도, 발생도, 검출도의 크리스프(crisp) 값을 이용하였고, 위험도를 도출하였다. 착륙장치에 대한 퍼지 FMEA 결과는 위험도와 우선순위를 분석할 수 있다. 퍼지 FMEA는 회전의 항공기의 품질 보증 활동에서 기초자료로 활용할 수 있음을 확인하였다.

**Abstract** Munitions must be analyzed to identify any risks for quality assurance in development and mass production. Risk identification for parts, compositions, and systems is carried out through failure mode effects analysis (FMEA) as one of the most reliable methods. FMEA is a design tool for the failure mode of risk identification and relies on the RPN (risk priority number). FMEA has disadvantages because its severity, occurrence, and detectability are rated at the same level. Fuzzy FMEA applies fuzzy logic to compensate for the shortcomings of FMEA. The fuzzy logic of Fuzzy FMEA is to express uncertainties about the phenomenon and provides quantitative values. In this paper, Fuzzy FMEA is applied to the failure mode of a rotorcraft landing system. The Fuzzy rule and membership functions were conducted in the Fuzzy model to study the RPN in the failure mode of a landing system. This method was selected to demonstrate crisp values of severity, occurrence, and detectability. In addition, the RPN was obtained. The results of Fuzzy FMEA for the landing system were analyzed for the RPN and ranking by fuzzy logic. Finally, Fuzzy FMEA confirmed that it could use the data in quality assurance activities for rotorcraft.

**Keywords** : Rotorcraft landing system, FMEA, Fuzzy rule, Fuzzy FMEA, RPN

---

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

email: coolnac@naver.com

Received August 25, 2020

Accepted January 8, 2021

Revised September 14, 2020

Published January 31, 2021

## 1. 서론

군수품에 대한 위험 식별은 개발 및 양산단계 품질보증 활동의 업무로서 계약문서, 업체 품질보증계획서, 연구 개발자료, 과거 계약이행 정보, 고객 불만 및 피드백 정보 등을 통해 제품, 프로세스, 원자재 등에 존재하는 잠재된 위험을 구체적으로 파악하는 활동이다[1]. 위험 식별의 등급은 다양하게 분류할 수 있으며, 위험의 속성 중 위험 발생 가능성과 위험 영향을 각각 5등급으로 분류할 수 있다. 또한, 위험 식별의 등급은 정량화된 위험 발생 가능성과 위험 영향을 고, 중, 저 등급으로 구성된 매트릭스(matrix)를 통해 위험에 대한 관리 방안을 수립할 수 있다. 위험 식별의 단점은 지나치게 주관적인 개입이나 위험 등급 부여에 대한 타당성 확보 등으로 인해 객관성을 확보하기 어려운 것이다. 이러한 오류를 줄이기 위하여, 위험 식별은 고장 모드 영향 분석(Failure Mode, Effect and Analysis, 이하 FMEA) 또는 고장 모드 영향 및 치명도 분석(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, 이하 FMECA)을 통한 신뢰성 기법을 이용하여 객관성을 제고하고 있다. 여기서, 고장 모드는 기능에 대한 결함을 기술한 것으로 결함 유형이라고도 한다. 결함에 대하여 주 영향을 미치는 고장 모드는 적절한 대책을 세워 사전에 방지하고, 제조공정의 평가나 안전성의 평가 등에서 활용될 수 있다. FMEA는 고장해석을 위한 체계적 기법으로 1950년대 시스템의 오동작 문제를 연구하기 위하여 개발된 것이다. 1960년대 NASA에서 아폴로 인공위성을 비롯한 우주개발에 활용하여 큰 성과를 얻었다. 유사 용어인 FMECA는 MIL-STD-1629A를 통해 군수품에 적용하고 있다[2]. FMECA는 초기 설계단계에서 설계 대안을 선택할 수 있고, 치명도를 포함한 고장 모드의 영향을 고려할 수 있다. FMEA와 FMECA는 신뢰도 및 가용도 분석을 위한 기초 데이터를 제공하며, 현장 고장 분석 및 시정조치에 대한 우선순위를 결정할 수 있다.

FMEA와 FMECA는 퍼지 이론을 적용하여 다양한 분야에서 활용하고 있다. Renjith 등은 LNG 탱크의 고장 우선순위를 선정하기 위하여 퍼지 FMECA를 이용하였다[3]. Chanamool 등은 응급 부서에서 결함 고장을 분석하기 위해 퍼지 FMEA를 통해 우선순위를 분석하였다[4]. Yazdi 등은 FMEA와 퍼지 FMEA 비교 분석을 통해 착륙장치 기어에 대한 고장 우선순위를 분석하였다[5]. Park 등은 퍼지 FMEA를 이용하여 항공기 운영 위험 평가 모형을 제시하였다[6].

Table 1은 FMEA와 FMECA의 장단점을 비교한 것이다.

Table 1. Comparison of FMEA and FMECA

	Advantage	Disadvantage	Results
FMEA	Predominant results	Depends on subjective opinion	Priority
FMECA	Criticality analysis	Depends on probability of failure	

퍼지 FMEA는 FMEA의 자료가 있는 경우 활용할 수 있다. 반면, FMECA 및 퍼지 FMECA는 고장 확률 자료가 있는 경우 심각도와 치명도 위주의 장치 또는 체계에서 활용할 수 있다. 회전익 항공기 착륙장치는 고장에 대한 발생과 검출이 높은 체계로서 심각도, 발생도, 검출도를 통해 결과를 도출하는 FMEA를 통해 고장 우선순위를 확인하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 회전익 항공기 착륙장치에 대하여 퍼지(Fuzzy)이론을 적용하여 FMEA 분석을 수행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 개요

Fig. 1은 회전익 항공기 착륙장치의 퍼지 FMEA 적용을 위한 절차를 나타낸 것이다. 퍼지 FMEA는 퍼지 이론, 위험 식별 및 위험도에 대한 정의, 퍼지 FMEA 단계, 회전익 항공기 착륙장치의 FMEA, 퍼지화 모델 적용을 통한 결과 도출의 순서를 가진다.

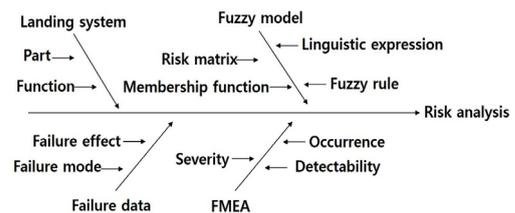


Fig. 1. Procedure of Fuzzy FMEA for the landing system

### 2.2 퍼지 이론

퍼지 이론은 Zadeh에 의해 제안된 모호하거나 불확실한 상태를 공학적인 언어로 표현하기 위한 이론이다[7]. 퍼지 이론은 부정확하고 불확실한 상태에서 합리적인 결정을 하는 것을 기초로 한다. 퍼지 이론의 장점은 언어적 변수(linguistic variable)를 정량화 할 수 있으며, 복잡한 현상의 문제를 단순화하여 정보의 손실을 최소화할

수 있다. 퍼지 이론은 0 또는 1인 두 개의 값을 취하는 특성 함수에 의해 규정되는 크리스프 집합(crisp set)을 소속 함수(membership function)를 이용하여 퍼지 집합(fuzzy set)으로 확장한 것이다. 퍼지 집합은 삼각형 및 사다리꼴 두 가지 형태로 구성한다.

Fig. 2는 삼각형과 사다리꼴 형태의 퍼지 집합을 나타낸 것이다. 삼각형 형태의 퍼지 집합은  $[a_1, a_3]$  간격에서 삼각형 꼴로 표현한다. 사다리꼴 형태의 퍼지 집합은  $[a_1, a_4]$  간격에서 사다리꼴로 표현한다.

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

$$V_i(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & a_4 < x \end{cases} \quad (2)$$

Where,  $x$  output

Fig. 3은 퍼지 모델을 나타낸 것으로서, 퍼지화를 통해 크리스프 값을 도출하는 과정을 나타낸 것이다.

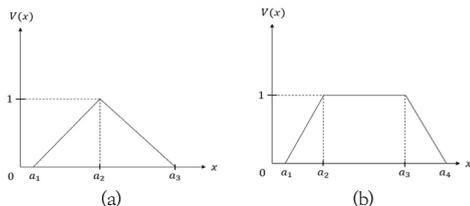


Fig. 2. Membership function  
(a) triangular form (b) trapezoidal form

퍼지화기(fuzzifier)는 수치적인 값을 퍼지 집합으로 변환시키는 연산자로서 크리스프 값을 퍼지 값으로 변환하는 역할을 한다. 퍼지 관계는 퍼지 추론인 IF-THEN

수행의 조합을 통해 결론을 얻을 수 있다. IF-THEN은 퍼지 입력 값(또는 변수)을 사용하는 전반부인 IF 부(part)와 퍼지 출력 값(또는 변수)에 해당하는 후반부인 THEN 부(part)로 구분한다. 예를 들어, IF 발생도 is 1 and 심각도 is 2 and 검출도 is 3 THEN 위험도 is 4로 표현할 수 있다. IF-THEN은 퍼지 규칙 기준을 만들고, 도출된 추론 결과가 여러 가지일 경우 합성으로 최종 추론 결과를 나타낸다.

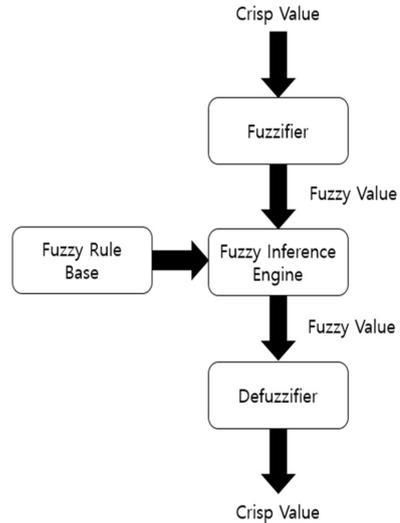


Fig. 3. Fuzzy model

퍼지 추론 엔진(fuzzy inference engine)은 소속도 함수들과 규칙 기준의 규칙을 이용하여 퍼지 출력 값을 추론하는 역할을 한다. 퍼지 추론 엔진은 퍼지 합성 연산을 이용한다. 퍼지 합성 연산의 종류는 맘다니(mamdani) 추론법인 최대 최소 합성, 최대 평균 합성, 최대 곱 합성 등이 있다. 본 논문에서는 최대 최소 합성을 이용하였다. 비퍼지화기(defuzzifier)는 퍼지 이론의 정량적인 결과로 퍼지 출력 값을 실제로 사용하기 위해 등가의 크리스프 값으로 변환하는 것이다. 비퍼지화 방법은 무게 중심법, 최댓값 법 등이 있다. 무게 중심법(Centroid Of Gravity, 이하 COG)은 가장 일반적으로 쓰이는 비 퍼지화 방법으로 함수의 무게 중심을 비퍼지화 값으로 선택하는 것이고, 최댓값 법(Mean Of Maximal, 이하 MOM)은 가장 큰 소속도를 비퍼지화 값으로 선택하는 것이다.

$$x_{COG} = \frac{\int x \cdot m(x) dx}{\int m(x) dx} \quad (3)$$

Where,  $x$  output,  $m$  Degree of membership

### 2.3 위험 식별 및 위험도

위험 식별은 FMEA, FMECA, FTA 등 신뢰성 분석 방법 중 적절한 방법을 선정하여 활용할 수 있다. FMEA는 발생 가능한 잠재 고장형태와 영향을 평가하여 위험의 우선순위가 높은 항목을 관리하는 기법이다. 고장 평가 방법은 고장 평점법, 치명도 평점법, 치명도 분석 등을 사용할 수 있다. FMEA를 이용한 위험도 평가는 고장 평점법으로 심각도(severity), 발생도(occurrence), 검출도(detectability)의 분석을 통해 결과를 나타낸다. 심각도는 위험 발생 시 해결 정도, 발생도는 발생 가능성, 검출도는 검사 시 검출할 수 있는 정도를 나타낸 것이다. FMEA에서 위험도(Risk Priority Number, 이하 RPN)는 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$RPN = S \times O \times D \quad (4)$$

Where,  $S$  Severity,  $O$  Occurrence,  $D$  Detectability

여기서, RPN은 심각도, 발생도, 검출도의 곱으로 정량화된 값으로 표현할 수 있다. RPN은 수치가 낮을수록 우선순위가 낮은 내림차순으로 I~V 단계 또는 I~X단계로 표현할 수 있다.

### 2.4 퍼지 FMEA

FMEA 분석은 평가 항목이 정성적이고, 주관적인 평가에 의존하기 때문에 결과에 대한 신뢰성이 떨어질 수 있다. 퍼지 이론을 적용한 퍼지 FMEA는 기존 FMEA와 다르게 인간의 사고를 기반으로 하는 방법론으로 위험도를 언어변수로 변환하여 현상의 불확실한 상태를 표현할 수 있다.

퍼지 FMEA 모델은 6단계를 통해 이루어진다.

단계 1 : 관련 전문가의 관찰과 질문을 통해 정보를 수집한다.

단계 2 : 체계, 구성품에 대한 모든 잠재적인 고장 모드, 영향 등을 결정한다.

단계 3 : 전문가에 의해 각 고장 모드의 점수를 평가하고, 퍼지 함수를 구성한다.

단계 4 : 퍼지 알고리즘을 통해 RPN을 계산한다.

단계 5 : 퍼지 모델을 통해 도출된 결과와 언어규칙을 비교 분석한다.

단계 6 : 퍼지 이론을 이용한 RPN 순위를 통해 각 항목에 대한 우선순위를 결정한다.

퍼지 규칙은 전문가의 경험적인 지식을 언어적 형태로 변환하는 것이다. 퍼지 추론을 위해 필요한 규칙의 개수는 입력변수의 공간을 할당하는 개수에 따라 달라진다. 퍼지 FMEA는 평가과정에 언어규칙에 따라 정량화할 수 있으며, 퍼지 연산을 이용하여 퍼지 RPN(이하 F-RPN)을 도출할 수 있다.

### 2.5 회전익 항공기 착륙장치

착륙장치는 비접이식 형태로 지상 착륙 시 완충장치 기능과 계류 시 기체를 지지해주는 기능을 한다. 착륙장치의 부품 및 구성품은 완충장치 조립체(shock strut assembly), 휠 조립체(wheel assembly), 드래그 빔 조립체(drag beam assembly) 등으로 구성되어 있다. 착륙장치는 회전익 항공기에서 전방과 무게 중심의 후방 양쪽에 장착되고, 장착된 부품 및 구성품은 착륙 시 충격에 의한 고장이 자주 발생하고, 착륙장치 중 타이어는 착륙장치의 다른 부품과 비교하면 마모에 의한 고장이 자주 발생한다. 본 논문에서 착륙장치의 고장 기능은 부품, 구성품, 체계 단위 중 체계 단위에서 부품 불량 및 마모 손상에 관련된 것을 분석하였다. Table 2는 회전익 항공기 착륙장치의 고장 모드를 나타낸 것이다. 착륙장치에 대한 고장 모드는 다양하지만, 퍼지 FMEA 적용을 위해 5가지로 선정하였다.

Table 2. Failure functions of landing system

	Function	Failure
Landing system	Loss of ground mode	Defective part
	Loss of emergency mode	
	Loss of crashworthiness	
	Oil leak	
	Damage of tire	Wear and tear

### 2.6 퍼지화 모델

퍼지화는 크리스프 값을 퍼지 값으로 바꾸는 과정이다. Table 3~5는 각각 발생도, 심각도, 검출도에 대한 언어변수를 정의한 것으로, 소속 함수를 도출하기 위해 제시되었다. 언어변수 및 심각도, 발생도, 검출도는 MIL-STD-882E에서 제시한 위험 매트릭스를 참고하였

고, 등급은 Very low - Low - Medium - High - Very High로 평가 기준을 구성하였다[8]. 이러한 심각도, 발생도, 검출도의 등급은 1~5의 크리스프 값으로 표현한다.

다음, 퍼지 규칙은 총 125개 선정하였고, 전문가의 경험적인 지식과 기존 FMEA 모델 등을 통해 분석되었다. 전문가는 회전의 항공기 착륙장치에 대한 군수품 품질보증활동 수행 경력자의 의견을 통해 도출되었다. 전문가는 5년 이상의 경력자 3명으로 구성하였고, 각 고장 모드에 대한 심각도, 발생도, 검출도의 등급은 Table 3~5를 활용하여 구성하였고, 퍼지 함수를 도출하였다.

Table 3. 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 4. 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 5. 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

Table 6은 착륙장치에 대해서 FMEA 결과를 나타낸 것이다. FMEA 결과는 내추락성 상실, 타이어 손상, 누유, 지상작동 상실, 비상작동 상실 순으로 고장에 대한 우선순위를 도출할 수 있다. 누유와 타이어 손상에 대한 RPN은 같은 값을 가지기 때문에 추가적인 검토가 필요한 사항이다.

Table 6. FMEA for landing system

Function		S	O	D	RPN
Landing system	Loss of ground mode	3	2	1	6
	Loss of emergency mode	3	1	1	3
	Loss of crashworthiness	5	1	4	20
	Oil leak	2	2	4	16
	Damage of tire	1	4	4	16

Fig. 4~5는 각각 10단계 5단계 퍼지 규칙을 정리하여 나타낸 것이다. Table 7은 125개로 구성된 10단계 위험도에 대한 퍼지 규칙을 나타낸 것이다. 10단계 퍼지 규칙은 F-RPN의 최댓값이 RPN의 최댓값인 125와 동일 값을 가질 수 있게 구성하였고, 기존 RPN과의 비교 분석에서 이용할 수 있다.

Table 7. Linguistic expressions for risk(10 stage)

Level	Category	Score
R	X	Unnecessary 12.5
	IX	Minor 25
	VIII	Very Low 37.5
	VII	Low 50
	VI	Medium 62.5
	V	Moderate 75
	IV	High 87.5
	III	Very High 100
	II	Necessary 112.5
	I	Absolute Necessary 125

Table 8은 125개로 구성된 5단계 위험도에 대한 퍼지 규칙을 나타낸 것이다. 5단계 퍼지 규칙은 우선순위 결정을 위해 도출하였다.

Table 8. Linguistic expressions for risk(5 stage)

Level	Category	Score
R	V	Minor 1
	IV	Low 2
	III	Medium 3
	II	High 4
	I	Necessary 5

RULE	IF		THEN		RULE		IF		THEN		RULE		IF		THEN				
	S	O	D	R	S	O	D	R	S	O	D	R	S	O	D	R			
R1	1	1	1	10	R26	2	1	1	20	R76	4	1	1	30	R101	5	1	1	40
R2	1	1	2	10	R27	2	1	2	30	R77	4	1	2	40	R102	5	1	2	50
R3	1	1	3	20	R28	2	1	3	40	R78	4	1	3	50	R103	5	1	3	60
R4	1	1	4	30	R29	2	1	4	50	R79	4	1	4	60	R104	5	1	4	70
R5	1	1	5	40	R30	2	1	5	60	R80	4	1	5	70	R105	5	1	5	80
R6	1	2	1	10	R31	2	2	1	30	R81	4	2	1	40	R106	5	2	1	50
R7	1	2	2	20	R32	2	2	2	40	R82	4	2	2	50	R107	5	2	2	60
R8	1	2	3	30	R33	2	2	3	50	R83	4	2	3	60	R108	5	2	3	70
R9	1	2	4	40	R34	2	2	4	60	R84	4	2	4	70	R109	5	2	4	80
R10	1	2	5	50	R35	2	2	5	70	R85	4	2	5	80	R110	5	2	5	90
R11	1	3	1	20	R36	2	3	1	40	R86	4	3	1	50	R111	5	3	1	60
R12	1	3	2	30	R37	2	3	2	50	R87	4	3	2	60	R112	5	3	2	70
R13	1	3	3	40	R38	2	3	3	60	R88	4	3	3	70	R113	5	3	3	80
R14	1	3	4	50	R39	2	3	4	70	R89	4	3	4	80	R114	5	3	4	90
R15	1	3	5	60	R40	2	3	5	80	R90	4	3	5	90	R115	5	3	5	100
R16	1	4	1	30	R41	2	4	1	40	R91	4	4	1	50	R116	5	4	1	60
R17	1	4	2	40	R42	2	4	2	50	R92	4	4	2	60	R117	5	4	2	70
R18	1	4	3	50	R43	2	4	3	60	R93	4	4	3	70	R118	5	4	3	80
R19	1	4	4	60	R44	2	4	4	70	R94	4	4	4	80	R119	5	4	4	90
R20	1	4	5	70	R45	2	4	5	80	R95	4	4	5	90	R120	5	4	5	100
R21	1	5	1	40	R46	2	5	1	50	R96	4	5	1	60	R121	5	5	1	70
R22	1	5	2	50	R47	2	5	2	60	R97	4	5	2	70	R122	5	5	2	80
R23	1	5	3	60	R48	2	5	3	70	R98	4	5	3	80	R123	5	5	3	90
R24	1	5	4	70	R49	2	5	4	80	R99	4	5	4	90	R124	5	5	4	100
R25	1	5	5	80	R50	2	5	5	90	R100	4	5	5	100	R125	5	5	5	100

Fig. 4. Fuzzy rule(10 stage)

RULE	IF		THEN		RULE		IF		THEN		RULE		IF		THEN	
	S	O	D	R	S	O	D	R	S	O	D	R	S	O	D	R
R1	1	1	1	1	R26	2	1	1	1	R51	3	1	1	1	1	2
R2	1	1	2	1	R27	2	1	2	1	R52	3	1	2	2	2	3
R3	1	1	3	1	R28	2	1	3	2	R53	3	1	3	3	3	3
R4	1	1	4	2	R29	2	1	4	2	R54	3	1	4	4	4	3
R5	1	1	5	2	R30	2	1	5	3	R55	3	1	5	3	5	4
R6	1	2	1	1	R31	2	2	1	1	R56	3	2	1	2	1	3
R7	1	2	2	1	R32	2	2	2	2	R57	3	2	2	2	2	3
R8	1	2	3	2	R33	2	2	3	2	R58	3	2	3	3	3	4
R9	1	2	4	2	R34	2	2	4	3	R59	3	2	4	3	4	4
R10	1	2	5	3	R35	2	2	5	3	R60	3	2	5	4	5	4
R11	1	3	1	1	R36	2	3	1	1	R61	3	3	1	2	1	3
R12	1	3	2	2	R37	2	3	2	2	R62	3	3	2	3	2	4
R13	1	3	3	3	R38	2	3	3	3	R63	3	3	3	3	3	4
R14	1	3	4	3	R39	2	3	4	3	R64	3	3	4	3	4	4
R15	1	3	5	3	R40	2	3	5	4	R65	3	3	5	4	5	5
R16	1	4	1	2	R41	2	4	1	1	R66	3	4	1	3	1	3
R17	1	4	2	2	R42	2	4	2	2	R67	3	4	2	3	2	4
R18	1	4	3	3	R43	2	4	3	3	R68	3	4	3	3	3	4
R19	1	4	4	3	R44	2	4	4	4	R69	3	4	4	4	4	5
R20	1	4	5	3	R45	2	4	5	4	R70	3	4	5	4	5	5
R21	1	5	1	2	R46	2	5	1	1	R71	3	5	1	3	1	4
R22	1	5	2	3	R47	2	5	2	2	R72	3	5	2	3	2	4
R23	1	5	3	3	R48	2	5	3	3	R73	3	5	3	4	3	5
R24	1	5	4	4	R49	2	5	4	4	R74	3	5	4	4	4	5
R25	1	5	5	4	R50	2	5	5	4	R75	3	5	5	5	5	5

Fig. 5. Fuzzy rule(5 stage)

## 2.7 위험도 평가

Fig. 6~8은 각각 심각도, 발생도, 검출도에 대한 퍼지 함수를 나타낸 것이다. x축은 입력 값(score), y축은 소속도(degree of membership)를 나타낸다. 퍼지 함수 분석 도구는 Excel을 이용하여 도출하였다.

Table 9~10은 각각 10단계 및 5단계 위험도를 통해 F-RPN을 도출하여 정리한 것이다. 누유와 타이어 손상의 결과를 비교 분석하면, 심각도, 발생도는 다르지만 RPN은 동일한 값을 가진다. F-RPN은 누유보다 타이어 손상의 값이 크기 때문에 우선순위를 높게 설정할 수 있다. 타이어 손상에 대한 F-RPN이 누유에 대한 F-RPN보다 높게 나온 이유는 착륙장치의 고장 분석 시, 심각도보다 발생도 및 검출도의 가중치를 높게 주었기 때문이다. 가중치는 소속도 구성에서 확인할 수 있다. 소속도 구성은 심각도와 발생도의 그래프에서 1~3점까지 동일하고, 4~5점에서 차이가 나타남을 확인할 수 있다.

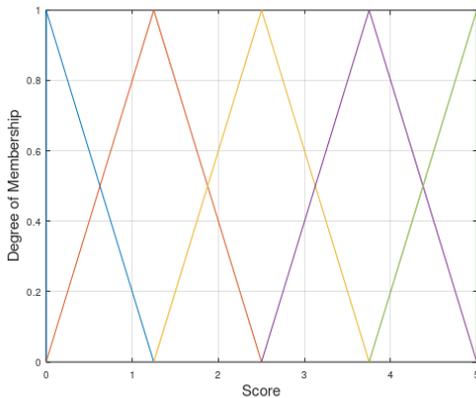


Fig. 6. Membership functions for severity

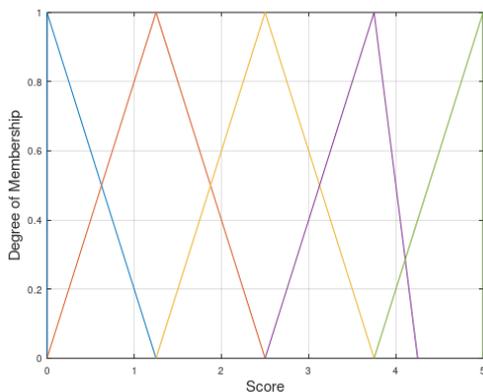


Fig. 7. Membership functions for occurrence

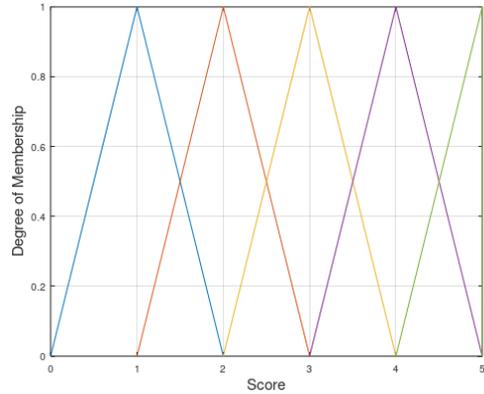


Fig. 8. Membership functions for detectability

Table 9. Fuzzy FMEA for landing system(10 stage)

Function		S	O	D	F-RPN
Landing system	Loss of ground mode	3	2	1	40
	Loss of emergency mode	3	1	1	39.3
	Loss of crashworthiness	5	1	4	85
	Oil leak	2	2	4	66.7
	Damage of tire	1	4	4	75

Table 10. Fuzzy FMEA for landing system(5 stage)

Function		S	O	D	F-RPN
Landing system	Loss of ground mode	3	2	1	2.22
	Loss of emergency mode	3	1	1	1.86
	Loss of crashworthiness	5	1	4	3.8
	Oil leak	2	2	4	3
	Damage of tire	1	4	4	3.18

착륙장치는 잦은 고장빈도를 가지고, 다른 체계와 비교하면 작은 피해를 가지므로 퍼지 함수 및 소속도에서 발생도와 검출도의 높은 등급에서 가중치가 높게 구성된 결과이다.

## 3. 결론

회전의 항공기는 기술의 진보로 고도화됨에 따라 개발 및 양산단계에서 위험 식별을 위해 고장 분석을 철저히 진행해야 한다. 본 논문에서는 퍼지 FMEA를 통해 착륙장치의 고장 모드를 분석하였고, 우선순위를 결정하였다. 이에 따른 내용은 다음과 같다.

- 1) 퍼지 이론은 복잡하고 다양한 문제에 대해서 논리적인 언어적 형태를 구성하는 방법이다. 퍼지 이론을 이용한 퍼지 FMEA는 정량적인 값을 통해 고장 분석에 대한 우선순위를 도출할 수 있다.
- 2) 착륙장치에 대한 고장 모드는 심각도보다 발생도, 검출도에 영향을 많이 미친다. 퍼지 FMEA는 전문가의 의해 발생도, 검출도의 가중치를 높게 설정한 퍼지 함수를 구성할 수 있다.
- 3) 착륙장치의 주요 5가지 고장 모드에 대해서 F-RPN을 통해 우선순위를 도출하였다. F-RPN은 동일한 RPN에 대해 우선순위를 확인할 수 있다.
- 4) 퍼지 이론을 통한 FMEA는 회전익 항공기의 고장 분석에서 더 분석적이고 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.
- 5) 향후 회전익 항공기의 타 체계에 대한 FMECA 및 퍼지 FMECA를 통한 연구를 진행할 예정이다.

## References

- [1] 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>
- [2] Depart of Defense, MIL-STD-1629A Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis, 1980.
- [3] V. R. Renjith, M. J. kalathil, P. H. Kumar, D. Madhavan, "Fuzzy FMECA(failure mode effect and criticality analysis) of LNG storage facility", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.56, pp.537-547, Jan. 2018.  
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.01.002>
- [4] N. Chanamool, T. Naenna, "Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department", *Applied Soft Computing*, Vol.43, pp.441-453, Jan. 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2016.01.007>
- [5] 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>
- [6] J. H. Park, C. S. Park, S. E. Ahn, "Aircraft operational

risk assessment model using Fuzzy-FMEA", *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, Vol.21, No.1, pp.67-75, March. 2016.

- [7] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and control*, Vol.8, pp.338-353 Nov. 1965.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/2.53>
- [8] Department of Defense Standard Practice, MIL-STD-882E System Safety, 2012.

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

이 광 은(Gwang-Eun Lee)

[정회원]



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

<관심분야>

품질경영, 항공공학, 항공기구조, 복합재료