

논문 2018-13-24

퍼지추론을 이용한 신뢰성 시험 대상 품목 선정 전략 (A Strategy of Selecting Critical Items for Reliability Tests Using Fuzzy Inference)

손 영 범, 양 정 민*

(Young-Beom Son, Jung-Min Yang)

Abstract : The reliability test is a crucial step for ensuring robustness of high-cost and complex weapon systems. In this paper, we present a set of quantitative criteria to select critical parts or components in weapon systems for the reliability test, and implement a fuzzy inference system by applying developed criteria to fuzzy theory. We classify the selection criteria of critical parts or components into four fuzzy sets and membership functions. A fuzzy inference rule is proposed based on the AHP (Analytic Hierarchy Process) analysis technique so as to derive a convincing reliability test. The credibility of the fuzzy inference system is confirmed through a case study using actual equipment data exacted from an existent weapon system.

Keywords : Reliability test, Weapon system, Fuzzy inference, AHP analysis

1. 서 론

최근 방위산업에서 개발 및 생산되는 시스템의 기능이 복잡해지고 구성품의 수량이 방대해짐에 따라 고장 발생율은 늘어나고 있으며, 새로운 기술과 재료가 계속 등장함에 따라 신뢰성이 평가되지 않은 분야가 넓어져 불안정성은 점점 커지고 있다. 국내의 정밀가공능력과 제조속도로는 뛰어나기 때문에 선진국과 비교하여 시스템의 초기 품질은 우수하나 내구성 평가에서는 많이 뒤쳐진다. 이를 극복하기 위해서는 예상되는 불량률 조기에 검출하여 초기고장 기간부터 마모고장 단계까지 시장 불량률을 감소시키기 위한 신뢰성 시험이 요구된다.

신뢰성 시험은 고가의 시험 시료와 시험 장비, 데이터 분석 등이 필요하기 때문에 개발 비용을 증가시키고 장시간의 신뢰성 시험 절차 때문에 개발 기간도 늘인다. 또한 스트레스 인자 설정 등 시험 방법의 유효성, 개발 단계의 시료에서 나타난 고장 유형에 대한 판단 기준 등 여러 가지 관련 문제가 발생할 수 있다.

최근 방위산업청에서 개정한 방위사업관리규정, 무기체계 RAM (Reliability, Availability, Maintainability) 업무지침, 종합군수지원 개발 실무지침서, 무기체계 시험평가 실무 가이드북 등에서는 위에서 언급된 개발 비용 및 개발 기간 등의 제한 사항을 고려하여 체계개발 단계에서 핵심부품에 대한 신뢰성 시험을 중점적으로 언급하고 있다 [1-4]. 하지만 중요한 핵심부품 선정 기준에 대해서는 “고장유형 및 영향, 치명도 분석 (FMECA) 결과, 기술성숙도 평가 결과, 창정비 대상품목 등을 고려한 사업/체계별 특성에 맞는 핵심부품·구성품 선정 기준 (신뢰성, 기술성숙도, 정비성 등)을 수립하고 이에 따른 핵심부품·구성품을 선정한다.”라는 모호한 표현으로만 기술되어 있으며 [1, 4], 현재까지 구체적인 선정 방안 및 적용 사례는 확인되지 않고 있다.

이번 연구에서는 방위산업 개발 시스템에 대한 체계적인 신뢰성 시험 대상 품목 선정 방안으로서

*Corresponding Author (jmyang@ee.knu.ac.kr)

Received: Jan. 26 2018, Revised: Mar. 19 2018, Accepted: Mar 19 2018.

Y. Son: Hanwha Systems, J. Yang: Kyungpook National University

※ 본 논문은 2015년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임 (No. NRF-2015R1D1A1A01056764). 본 논문은 2015년도 정부 (미래부)의 재원으로 한국연구재단 바이오·의료기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2015M3A9A7067220).

퍼지추론을 이용한 방법을 제안한다. 퍼지추론은 인간이 갖고 있는 복잡한 시스템을 근사적으로 이해하고 추론하는 능력을 구현할 수 있는 방법 중의 하나로서, 핵심부품 선정 기준 각 항목간의 영향성과 정성적인 판단 기준을 퍼지집합의 개념으로 정리할 수 있다. 먼저 핵심부품 선정 기준을 정량적으로 표현하기 위해 방위사업관리규정에서 기술된 내용을 바탕으로 4가지의 선정 기준을 설정한다. 그런 다음 선정 기준을 입력으로 하는 퍼지 집합과 소속도 함수를 정의한다. AHP (Analytic Hierarchy Process) 기법을 이용하여 전문가의 의견을 반영한 퍼지 입력 항목 가중치를 결정하며 무게중심법과 비퍼지화 방법을 통해 대상 품목에 대한 시험대상 우선순위를 최종 결정한다.

본 논문에서는 특히 야전 배치되어 운용중인 열상감지기 (TOD, Thermal Observation Device) TAS-815K 시스템에 퍼지 추론 시스템을 적용한 결과를 보임으로써 제안된 신뢰성 시험 대상 품목 선정 전략의 실제성을 검증한다.

II. 신뢰성 시험 핵심부품 선정 기준

방위사업관리규정 [1]에 기술되어 있는 신뢰성 시험을 위한 기준 핵심부품 선정 기준은 다음과 같다.

- 필수임무기능에 해당되는 경우
 - 고장유형 및 영향, 치명도 분석 결과 치명도가 높은 경우
 - 기술성숙도 평가 결과 상대적으로 낮은 기술 수준인 경우
 - 창정비를 요하는 대상품목인 경우
- 위의 네 가지 선정 기준을 퍼지 이론 및 추론에 적용하기 위해 검토해본 결과 다음과 같은 문제점을 확인하였다.

① 필수임무기능

필수임무기능이란 시스템이 특정 임무를 수행하기 위해 반드시 정상적으로 수행되어야 하는 기능이다. 대부분 전자장비 구성품의 기능은 필수임무기능에 해당하므로 핵심부품의 선정 기준으로 적용하기에는 그 범위가 너무 포괄적이라 변별력이 떨어진다고 판단된다.

② 고장유형 및 영향, 치명도 분석

치명도 값은 $C_m = \beta\alpha\lambda_p t$ 와 같이 정의되는데 여기서 C_m 은 고장 유형 치명도, β 는 임무 수행이 불가능한 조건부 확률, α 는 고장 유형비, λ_p 는 부품 또는 구성품의 고장율, t 는 특정 임무 단계에서 부

품 또는 구성품이 작동하는 시간을 의미한다 [5]. 치명도 값은 특정 고장 모드에 대한 고장 빈도 및 실제 발생 가능한 조건부 확률을 의미한다. 고장 빈도의 경우 신뢰도 예측 결과 및 제조사 제공 자료를 활용하여 자료의 객관성을 보증할 수 있으나, 발생 가능한 조건부 확률의 경우 분석자 본인의 경험 또는 주관에 의지하므로 객관성이 떨어진다. 따라서 신뢰도 예측 결과를 활용한 고장 빈도를 하나의 핵심부품 선정 기준으로 활용하고 조건부 확률이 적용된 치명도 값은 선정 기준에서 제외한다. 대신 위험우선순위 (RPN, Risk Priority Number) 확인 시 적용되는 심각도 (Severity)를 핵심부품 선정 기준으로 활용한다. 심각도는 고장이 시스템에 미치는 영향을 세분화하여 평가 기준을 설정하므로 필수임무기능에 해당하는지 여부를 직접적으로 포함하고 있다.

③ 기술성숙도 평가 결과

기술성숙도 평가 결과 (TRL, Technology Readiness Level)는 특정 핵심기술요소의 무기체계 적용 준비도를 나타내는 척도로서 1~9단계까지 정의하며 단계가 높을수록 무기체계 개발에 적용할 수 있는 완성도가 높음을 의미한다 [6]. TRL은 주로 개발자의 직접적이고 객관적인 분석 내용을 기준으로 단계가 정의되므로 핵심부품 선정 기준으로 가공 없이 직접 활용하기에 적절하다.

④ 창정비를 요하는 대상품목

창정비를 요하는 대상품목이란 해당 부품이나 구성품에 고장이 발생할 경우 완전 수리를 위해 군 직 창이나 생산 업체에 입고 수리를 요하는 품목을 의미한다. 대부분의 전자장비 구성품이 창정비를 요하는 대상품목에 해당하므로 이 역시 핵심부품의 선정 기준으로 적용하기에는 변별력이 떨어지고 이치 논리적이다. 본 연구에서는 창정비를 요하는 대상품목에 대한 의미를 간접적으로 해석하여 (i) 해당 품목이 현장에서 교환되어 창정비를 위해 입고될 경우 해외업체 정비를 필요로 하는가, (ii) 해당 품목이 현장에서 교환되어 창정비를 위해 입고될 경우 정비에 얼마나 많은 시간이 소요되는가를 고려한다. 이러한 두 가지 기준을 '정비도'로 정의하고 대상품목을 세부적인 정비도 단계로 구분하고 핵심부품 선정 기준으로 활용한다.

정리하면 본 연구에서는 기존 선정 기준 대신 현실적인 방위산업 개발 시스템에 대한 제한 조건을 반영한 고장 빈도, 심각도, 기술성숙도, 정비도 등 새로운 네 가지 신뢰도 시험 품목 선정 기준을 도입한다.

표 1. 고장 빈도에 대한 퍼지 집합
Table 1. Fuzzy set for failure rate

Rank	Fuzzy rating (Fuzzy number)	Meaning
1	Very low [VL]	Annual failure rate<0.1
2	(1, 1, 2, 3.5)	$0.1 \leq \text{Annual failure rate} < 0.14$
3	Low [LO]	$0.14 \leq \text{Annual failure rate} < 0.2$
4	(1.5, 3, 4, 5.5)	$0.2 \leq \text{Annual failure rate} < 0.33$
5	Average [AV]	$0.33 \leq \text{Annual failure rate} < 0.67$
6	(3.5, 5, 6, 7.5)	$0.67 \leq \text{Annual failure rate} < 1$
7	High [HI]	$1 \leq \text{Annual failure rate} < 2$
8	(5.5, 7, 8, 9.5)	$2 \leq \text{Annual failure rate} < 3$
9	Very high [VH]	$3 \leq \text{Annual failure rate} < 4$
10	(7.5, 9, 10, 10)	$4 \leq \text{Annual failure rate}$

표 2. 심각도에 대한 퍼지 집합
Table 2. Fuzzy set for severity

Rank	Fuzzy rating (Fuzzy number)	Meaning
1	Negligible [NE] (1, 1, 2, 3.5)	No effect
2		System operable with minimal interference
3	Marginal [MA] (1.5, 3, 4, 5.5)	System operable with some degradation of performance
4		System operable with significant degradation of performance
5	Moderate [MO] (3.5, 5, 6, 7.5)	System inoperable without damage
6		System inoperable with minor damage
7	Critical [CR] (5.5, 7, 8, 9.5)	System inoperable with equipment damage
8		System inoperable with destructive failure without compromising safety
9	Catastrophic [CA] (7.5, 9, 10, 10)	Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe system operation with warning
10		Very high severity ranking when a potential failure mode effects safe system operation without warning

III. 퍼지 집합 및 소속도 함수 결정

앞서 설정한 신뢰성 시험을 위한 핵심부품 선정 기준을 구체화하여 다음과 같은 해당 퍼지 집합 및 소속도 함수를 정의하였다.

1. 고장 빈도

고장 빈도는 고장이 얼마나 자주 일어나는가에 대한 평가 지표이다. 각 시스템마다 주어진 임무 및 기능에 따라 장비 운용 시간이 다르므로 시스템에

표 3. 기술성숙도에 대한 퍼지 집합
Table 3. Fuzzy set for TRL

Rank	Fuzzy rating (Fuzzy number)	Meaning	Phase
1	Mature [MA] (1, 1, 3, 4.5)	Level 9: Actual system proven through successful mission operations	Full Scale Development
2		Level 8: Actual system completed and qualified through test and demonstration	
3		Level 7: System prototype demonstration in an operational environment	
4	Immature [IM] (2.5, 4, 5, 6.5)	Level 6: System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment	Exploratory Development
5		Level 5: Component and/or breadboard validation in a relevant environment	
6	Infant [IN] (4.5, 6, 9, 9)	Level 4: Component and/or breadboard validation in a laboratory environment	Technical Development
7		Level 3: Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept	
8		Level 2: Technology concept and/or application formulated	
9		Level 1: Basic principles observed and reported	

할당된 연간운용시간을 기준으로 다음과 같이 환산된 연간고장빈도 (Annual failure rate)를 5개의 소속도 함수로 구분하여 표 1과 같이 평가 기준으로 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{Annual failure rate} &= \frac{\text{Annual operating time}}{MTBF} \\
 &= \frac{\text{Annual operating time} \times \lambda}{1,000,000}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

식 (1)에서 Annual operating time은 연간운용 시간, MTBF (Mean Time Between Failures)는 수리 가능한 장비에 대해 고장이 발생하였을 경우 고장을 복구한 시점부터 다음 고장 시점까지의 평균 시간이다. MTBF는 장비가 운용되는 환경 및 운용 온도, 부품 품질 등급, 종류, 정격 및 부하특성 등을 사용하여 계산된다 [7]. 또 λ는 단위 시간당 발생하는 고장 발생 빈도이다. 단위 시간 (min, hour 등)을 기준으로 고장 발생 빈도를 표현할 경우 수치가 너무 작게 표기되므로 방산 분야에서는 통상적으로 백만 시간을 기준으로 고장 발생 빈도 λ를 표기한다. MTBF와 고장율의 관계는 식 (2)와 같다.

$$MTBF = \lambda / 1,000,000
 \tag{2}$$

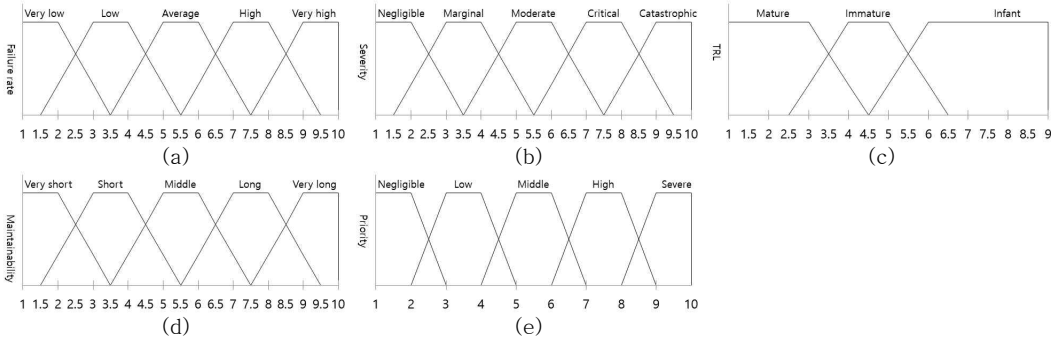


그림 1. 소속도 함수; (a) 고장 빈도; (b) 심각도; (c) 기술성숙도; (d) 정비도; (e) 우선순위

Fig. 1 Fuzzy membership function for (a) failure rate; (b) severity; (c) TRL; (d) maintainability; (e) priority

표 4. 정비도에 대한 퍼지 집합
Table 4. Fuzzy set for maintainability

Rank	Fuzzy rating (Fuzzy number)	Meaning
1	Very short [VS]	Domestic maintenance & maintenance lead time within 1 month
2	(1, 1, 2, 3.5)	Overseas maintenance & maintenance lead time within 1 month
3	Short [SH]	Domestic maintenance & maintenance lead time within 3 months
4	(1.5, 3, 4, 5.5)	Overseas maintenance & maintenance lead time within 3 months
5	Middle [MI]	Domestic maintenance & maintenance lead time within 6 months
6	(3.5, 5, 6, 7.5)	Overseas maintenance & maintenance lead time within 6 months
7	Long [LO]	Domestic maintenance & maintenance lead time within 9 months
8	(5.5, 7, 8, 9.5)	Overseas maintenance & maintenance lead time within 9 months
9	Very long [VL]	Domestic maintenance & maintenance lead time within 12 months
10	(7.5, 9, 10, 10)	Overseas maintenance & maintenance lead time within 12 months

표 5. 우선순위에 대한 퍼지 집합
Table 5. Fuzzy set for priority order

Fuzzy rating	Fuzzy number
Negligible [NE]	(1, 1, 2, 3.5)
Low [LO]	(1.5, 3, 4, 5.5)
Middle [MI]	(3.5, 5, 6, 7.5)
High [HI]	(5.5, 7, 8, 9.5)
Severe [SE]	(7.5, 9, 10, 10)

표 6. AHP 분석 기법을 활용한 가중치 결정 결과
Table 6. Weight factor using AHP analysis

	Failure rate	Severity	TRL	Maintainability	Note
Weight	0.36	0.39	0.16	0.08	Geometric mean

2. 심각도

심각도는 고장이 발생할 경우 시스템 운용에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 평가 지표이다. 본 논문에서는 고장 징후에 대한 사전 탐지 여부, 인명 피해 여부, 장비 손상 및 시스템 작동 여부에 따라 차등적으로 구분한 심각도 수준을 5개의 소속도 함수로 구분하여 표 2와 같이 평가 기준으로 적용하였다 [8].

3. 기술성숙도

기술성숙도는 핵심기술요소의 무기체계적용 성숙도를 나타내는 평가 지표로서 이번 연구에서는 3개의 소속도 함수로 구분하여 표 3과 같이 평가 기준으로 적용하였다.

4. 정비도

정비도는 고장이 발생할 경우 얼마나 신속하게 정상 상태로 복구할 수 있는가에 대한 평가 지표이다. 앞서 언급한 바와 같이 창정비를 위해 입고된 품목의 수리를 위해 해외업체 정비 여부 및 정비 기간을 고려하여 5개의 소속도 함수로 구분하여 표 4와 같이 평가 기준으로 적용하였다.

5. 우선순위

퍼지 추론을 통해 앞에서 정의한 네 가지 입력 퍼지 집합에 대응되어 나오는 출력 퍼지 집합은 '우선순위', 즉 신뢰성 시험 대상 품목을 위한 순서이다. 본 연구에서는 우선순위를 5개 소속도 함수로 구분하여 표 5와 같이 적용하기로 한다.

표 1~5에서 정의한 퍼지 집합과 소속도 함수를 그래프로 각각 표현하면 그림 1. (a)~(e)와 같다.

표 7. 우선순위에 대한 퍼지 추론 시스템

Table 7. Fuzzy inference rules for priority order

Rule	IF				THEN	Rule	IF				THEN
	Failure rate	Severity	TRL	Maintainability			Failure rate	Severity	TRL	Maintainability	
1	VL	NE	-	-	NE	32	AV	CR	IN	-	MI
2	VL	MA	IN	-	NE	33	AV	CR	IM	VS/SH/MI	MI
3	VL	MA	IM	VS/SH	NE	34	AV	CR	IM	LO/VL	HI
4	VL	MA	IM	MI/LO/VL	LO	35	AV	CR	MA	-	HI
5	VL	MA	MA	-	LO	36	AV	CA	-	-	HI
6	VL	MO	-	-	LO	37	HI	NE	IN	-	LO
7	VL	CR	IN	-	LO	38	HI	NE	IM	VS/SH/MI	LO
8	VL	CR	IM	VS/SH	LO	39	HI	NE	IM	LO/VL	MI
9	VL	CR	IM	MI/LO/VL	MI	40	HI	NE	MA	-	MI
10	VL	CR	MA	-	MI	41	HI	MA	-	-	MI
11	VL	CA	-	-	MI	42	HI	MO	IN	-	MI
12	LO	NE	IN	-	NE	43	HI	MO	IM	VS/SH/MI	MI
13	LO	NE	IM	VS/SH	NE	44	HI	MO	IM	LO/VL	HI
14	LO	NE	IM	MI/LO/VL	LO	45	HI	MO	MA	-	HI
15	LO	NE	MA	-	LO	46	HI	CR	-	-	HI
16	LO	MA	-	-	LO	47	HI	CA	IN	-	HI
17	LO	MO	IN	-	LO	48	HI	CA	IM	VS/SH/MI	HI
18	LO	MO	IM	VS/SH	LO	49	HI	CA	IM	LO/VL	SE
19	LO	MO	IM	MI/LO/VL	MI	50	HI	CA	MA	-	SE
20	LO	MO	MA	-	MI	51	VH	NE	-	-	MI
21	LO	CR	-	-	MI	52	VH	MA	IN	-	MI
22	LO	CA	IN	-	MI	53	VH	MA	IM	VS/SH/MI	MI
23	LO	CA	IM	VS/SH	MI	54	VH	MA	IM	LO/VL	HI
24	LO	CA	IM	MI/LO/VL	HI	55	VH	MA	MA	-	HI
25	LO	CA	MA	-	HI	56	VH	MO	-	-	HI
26	AV	NE	-	-	LO	57	VH	CR	IN	-	HI
27	AV	MA	IN	-	LO	58	VH	CR	IM	VS/SH/MI	HI
28	AV	MA	IM	VS/SH	LO	59	VH	CR	IM	LO/VL	SE
29	AV	MA	IM	MI/LO/VL	MI	60	VH	CR	MA	-	SE
30	AV	MA	MA	-	MI	61	VH	CA	-	-	SE
31	AV	MO	-	-	MI						

IV. 퍼지 추론 시스템

본 연구에서는 퍼지 추론 기법으로 대표적인 추론 방법인 Max-Min 추론을 이용한다. Max-Min 추론을 적용하기에 앞서 각 퍼지 입력 항목에 대한 가중치를 결정하기 위해 AHP 분석 기법을 이용하여 전문가들의 의견을 종합하였다. 입력 항목 간 가중치에 대한 전문가 설문 조사를 실시한 후 설문 내용의 쌍대비교행렬을 정규화하고 일관성 검토를 통해 결정된 가중치는 표 6과 같다.또 각 입력 항목 간 결정된 가중치를 반영한 우선순위에 대한 퍼지 추론 규칙은 표 7과 같다.

퍼지 추론 시스템 적용 결과를 비퍼지값으로 변환하기 위해 본 논문에서는 무게중심법을 적용하여 대상 품목에 대한 우선순위를 최종 결정하기로 한다.

V. 사례 연구

제안된 퍼지 추론 시스템의 적절성을 실증하기 위해 현재 야전 배치되어 운용 중인 열상감지기(TOD) [9]의 구성품에 대한 신뢰성 시험 품목 선정 문제에 본 연구 결과를 적용해 보기로 한다.

열상감지기는 전방지역의 주요 감시지지에 배치되어 단독 또는 지상감시레이더와 복합 운용되고 있다. 주요 접근로와 침투로를 감시하는 역할을 수행하고 있으며 해·강안 지역의 고지군 및 해안선 일대 주요 감시지지에서는 해안레이더와 복합 운용되어 취약 지역을 감시하는 역할을 한다 [9]. 그림 2는 열상감지기의 주요 구성품과 기능을 도시한다.

1. 퍼지 추론 시스템 적용

본 논문에서는 열상감지기의 구성품 중 주요 기능을 담당하는 탐지 세트 하부의 구성품에 퍼지 추

표 8. TOD 탐지 세트 연간 고장 빈도
Table 8. Annual failure rate of TOD detection set

No.	Item name	MTBF	AOR	Annual failure rate	No.	Item name	MTBF	AOR	Annual failure rate
1	Detection set front housing assembly	50,566	5,110	0.10	17	Laser resonator	107,020	5,110	0.05
2	Detection set back housing assembly	92,792	5,110	0.06	18	Gas cell assembly	2,337,666	5,110	0.00
3	Detection set mounting housing assembly	35,935	5,110	0.14	19	Photodetector assembly	273,076	5,110	0.02
4	Digital compass assembly	51,432	5,110	0.10	20	Photodetector PCB	693,566	5,110	0.01
5	Objective lens assembly	309,352	5,110	0.02	21	Electronic mounting assembly	46,542	5,110	0.11
6	Thermal observation device power supply PCB	252,542	5,110	0.02	22	High power supply PCB	174,853	5,110	0.03
7	DSP PCB	83,048	5,110	0.06	23	LRF power supply PCB	130,919	5,110	0.04
8	Detector/Cooler assembly	15,249	5,110	0.34	24	CCD module	66,450	5,110	0.08
9	ASP PCB	92,549	5,110	0.06	25	LDU module	119,096	5,110	0.04
10	Lens driving assembly	20,255	5,110	0.25	26	LDU PCB	129,834	5,110	0.04
11	Low magnification lens driving assembly	97,893	5,110	0.05	27	Objective lens assembly	197,379	5,110	0.03
12	Medium magnification lens driving assembly	98,387	5,110	0.05	28	Mid cam assembly	485,185	5,110	0.01
13	Image correction lens driving assembly	94,456	5,110	0.05	29	Focus cam assembly	346,244	5,110	0.01
14	Compensating lens assembly	1,721,644	5,110	0.00	30	Controller PCB	29,049	5,110	0.18
15	Reflection mirror2/Imaging lens assembly	388,572	5,110	0.01	31	Power supply PCB	79,590	5,110	0.06
16	Raman laser resonator assembly	95,519	5,110	0.05	32	Location identifier antenna assembly	961,279	5,110	0.01

론 시스템을 적용하였다. 기존 체계개발 결과물을 주로 활용하였으며, 고장이 발생할 경우 장비의 복구를 위해 야전에서 교환이 가능한 최소 단위를 대상 품목으로 선정하였다. 열상감지기의 고장간 평균 시간 (MTBF)은 전자 구성품에 대한 신뢰도 산출 기준인 MIL-HDBK- 217FN2와 필드 데이터 통계 자료인 NPRD-95를 적용하여 산출하였다 [7, 10]. 본 기기는 지상에 고정된 형태로 운용되므로 GF (Ground Fixed)를 운용 기준으로 하고, 장비 규격서에서 규정하고 있는 최고 온도인 43℃를 운용 온도로 적용하였다. 또 연간고장빈도를 계산하기 위한 연간운용시간은 소요군에서 제시한 연간 운용 소요 (AOR, Annual Operating Requirements) 값을 활용하였다. 탐지 세트 구성품의 연간고장빈도를 구하기 위한 MTBF 기본 정보와 산출 결과는 표 8과 같다.

심각도에 대한 퍼지 입력값은 체계개발 당시 진행된 FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) 결과 중 얻어진 심각도 부호

(Severity Class)를 변형하여 사용하였다. 현재 방위사업에서 진행되는 대부분의 개발 사업은 MIL-STD-1629를 기준으로 적용하고 있으며, MIL-STD-1629에서는 심각도 부호를 Catastrophic, Critical, Marginal, Minor 4가지 등급으로 분류하고 있다 [11]. 본 논문에서는 심각도를 10가지 등급으로 좀 더 세분화하였으며, 탐지 세트의 기능과 임무에 대한 영향을 재분석하여 그 결과를 적용하였다.



그림 2. 열상감지기 주요 구성품
Fig. 2 Components of TOD

표 9. 열상감지기 탐지 세트 퍼지 추론 시스템 적용 결과

Table 9. Application results of the proposed fuzzy inference system to TOD detection set

No.	Item name	Fuzzy input				Fuzzy output	
		F/R	Severity	TRL	Maint.	Defuzzy	Priority
1	Detection set front housing assembly	2	4	1	1	4.08	3
2	Detection set back housing assembly	1	5	1	1	3.5	6
3	Detection set mounting housing assembly	3	2	1	3	3.3	19
4	Digital compass assembly	1	4	1	3	3.5	6
5	Objective lens assembly	1	4	1	3	3.5	6
6	Thermal observation device power supply PCB	1	4	1	3	3.5	6
7	DSP PCB	1	4	1	3	3.5	6
8	Detector/Cooler assembly	5	4	1	3	4.92	1
9	ASP PCB	1	4	1	3	3.5	6
10	Lens driving assembly	4	3	1	3	4.08	3
11	Low magnification lens driving assembly	1	3	1	3	3.3	19
12	Medium magnification lens driving assembly	1	3	1	3	3.3	19
13	Image correction lens driving assembly	1	3	1	3	3.3	19
14	Compensating lens assembly	1	3	1	3	3.3	19
15	Reflection mirror2/Imaging lens assembly	1	3	1	3	3.3	19
16	Raman laser resonator assembly	1	3	1	5	3.3	19
17	Laser resonator	1	3	1	5	3.3	19
18	Gas cell assembly	1	3	1	5	3.3	19
19	Photodetector assembly	1	4	1	3	3.5	6
20	Photodetector PCB	1	4	1	3	3.5	6
21	Electronic mounting assembly	2	4	1	3	4.08	3
22	High power supply PCB	1	4	1	3	3.5	6
23	LRP power supply PCB	1	4	1	3	3.5	6
24	CCD module	1	4	1	5	3.5	6
25	LDU module	1	3	1	1	3.3	19
26	LDU PCB	1	3	1	3	3.3	19
27	Objective lens assembly	1	3	1	3	3.3	19
28	Mid cam assembly	1	3	1	3	3.3	19
29	Focus cam assembly	1	3	1	3	3.3	19
30	Controller PCB	3	5	1	3	4.92	1
31	Power supply PCB	1	5	1	3	3.5	6
32	Location identifier antenna assembly	1	4	1	1	3.5	6

열상감지기는 이미 양산이 진행 중이고, 전력화 평가를 마쳐 제품 개선사항까지 조치가 완료된 제품이므로 기술성숙도에 대한 퍼지 입력값은 탐지 세트 구성품 모두 TRL Level 9를 적용하였다. 또 정비도에 대한 퍼지 입력값은 탐지 세트 구성품의 정비 형태 및 창정비 (업체) 리드타임을 고려하여 각각의 분석 결과를 적용하였다.

열상감지기의 탐지 세트 구성품에 대해 제안된 퍼지 추론 시스템 적용 결과는 표 9와 같다.

제안된 퍼지 추론 시스템 적용 결과 열상감지기의 신뢰성 시험을 위한 핵심부품은 우선순위를 기준으로 1순위는 검출기/냉각기 조립체, 제어기 회로 카드조립체, 2순위는 탐지세트 전면 하우징조립체, 렌즈구동부 조립체, 전자부착장 조립체 순으로 나타남을 확인할 수 있었다.

2. 열상감지기 운용 실적 분석

본 논문에서 획득한 열상감지기에 대한 퍼지 추론 시스템 적용 결과를 실제 고장 발생 이력이 있

는 구성품의 데이터와 비교하기 위해 최근 몇 년 간의 장비 운용 실적 자료를 다음과 같이 분석하고 조치하였다. 첫째, 제조상의 결함 및 사용자 과실 등에 의한 고장은 신뢰성 고장 범주에 포함되지 않으므로 배제하였다. 둘째, 신뢰성 고장 범주에 포함되는 고장에 대해 실제 야전 정비 수준에서 교환되는 구성품 단위로 고장 회수를 정리하였다. 셋째, 핵심부품에 대한 우선순위를 계산하기 위해 퍼지 추론에서 사용한 네 가지 입력 항목 중 연간 고장 빈도 대신 실제 고장 회수를 적용하였으며, 퍼지 추론 결과와 비교를 위해 AHP 분석 기법으로 결정된 가중치를 적용한 식 (3)을 계산에 적용하였다.

$$Priority = (Failure\ rate \times 0.36) + (Severity \times 0.39) + (TRL \times 0.16) + (Maintainability \times 0.08) \quad (3)$$

운용 실적 분석을 통해 정리된 고장 발생 이력이 있는 8개 품목에 대한 계산식 적용 결과는 표 10과 같다.

표 10. 운용 실적 분석 결과

Table 10. Analysis results of the operation data for TOD detection set

No.	Item name	No. of failure	Severity	TRL	Maintainability	Priority
1	Detector/Cooler assembly	52	4	1	3	20.68
2	Laser resonator	8	3	1	5	4.61
3	Medium magnification lens driving assembly	3	3	1	3	2.65
4	High power supply PCB	2	4	1	3	2.68
5	Controller PCB	2	5	1	3	3.07
6	Thermal observation device power supply PCB	2	4	1	3	2.68
7	Power supply PCB	1	5	1	3	2.71
8	Focus cam assembly	1	3	1	3	1.93

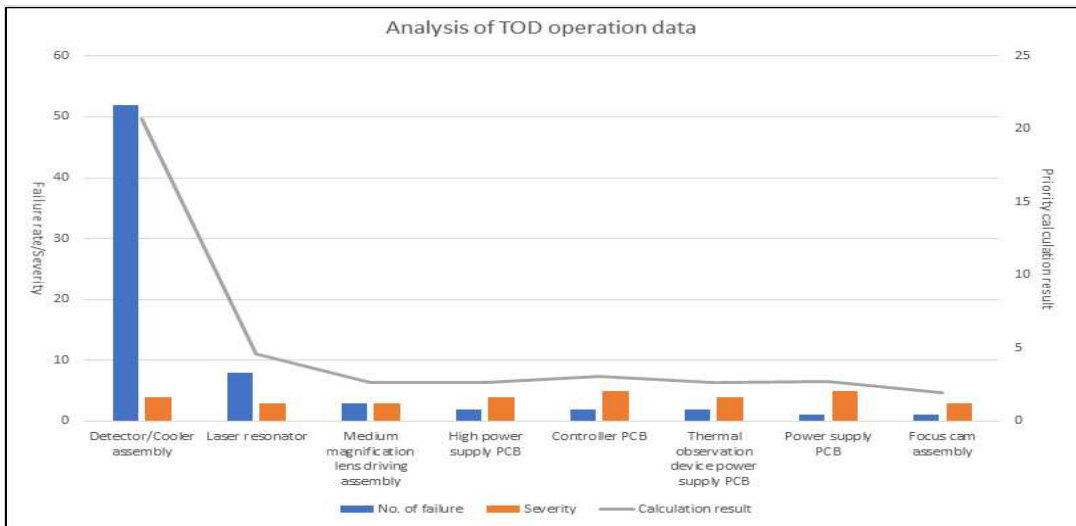


그림 3. 운용 실적 분석을 통한 우선순위 관계

Fig. 3 Priority order resulted from analysis of TOD operation data

운용 실적에 대한 분석 결과 중 가중치가 상대적으로 큰 고장 횟수에 대한 심각도와 우선순위 계산 결과의 관계를 그래프로 표현해 보면 그림 3과 같다.

상기 분석 결과를 보면 검출기/냉각기 조립체, 레이저발진기, 제어기 회로카드조립체 순으로 우선순위가 나타났다. 하지만 레이저발진기의 경우 고장 원인에 대한 구체적인 분석 결과 전자 구성품(BLU보드, 원격조정장치)의 고장보다 기구 구성품(레이저 봉, 렌즈, 반사경, 프리즘, 필터 등)의 고장이 많이 발생한 것을 확인하였다. 핵심부품의 신뢰성 시험은 주로 전자 구성품에 대한 신뢰성 시험을 의미하고 있으므로 전자 구성품의 고장 횟수 (2회)

를 사용하며 우선순위를 다시 계산하면 결과 값이 2.45로 낮아진다. 결국 우선순위가 높게 나타나는 구성품은 검출기/냉각기 조립체와 제어기 회로카드 조립체 2종이다. 이는 퍼지 추론 시스템을 기반으로 한 우선순위 추론 결과 중 1순위에 해당하는 구성품 2종과 일치하며, 퍼지 추론 시스템을 사용하여 신뢰성 시험 대상 품목을 체계개발 단계에서 선정하는 것이 타당함을 보여준다.

다만 체계개발 단계에서 수행되는 신뢰도 예측 과정에서 기구 구성품에 대한 고장율은 별도의 계산 없이 유사 품목의 고장 통계 자료를 주로 사용하게 되는데, 레이저발진기와 같이 개발 단계에서의

신뢰도 예측 결과 대비 실제 운용 단계에서 고장이 많이 발생한 경우에 대해서는 구체적인 원인 분석 및 통계 자료의 최신화가 필요하다. 또한 레이저발진기의 실제 고장 이력을 고려하여 퍼지 추론 시스템의 고장 빈도 입력값을 높게 변경할 경우 퍼지 추론 결과 또한 다르게 나타났을 것으로 판단된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 방위산업에서 개발 및 생산되는 장비를 대상으로 신뢰성 시험을 위한 핵심부품 선정 기준을 정량적으로 표현할 수 있도록 정의하고, 이를 퍼지이론에 적용하여 퍼지 추론 시스템을 구현한 후 실제 시스템인 열상감지기에 적용해 보았다. 본 논문에서 제시하고 있는 핵심부품 선정 기준은 시스템의 양산 시제품이 설계 및 제작되는 체계 개발 과정에서 적용되어야 하며, 실제 신뢰성 시험을 통해 해당 품목에 대한 신뢰도 및 안정성이 입증되어야 한다. 하지만 사례 연구에서 살펴본 바와 같이 체계개발 과정에서 생성되는 데이터를 기반으로 신뢰성 시험을 위한 핵심부품을 선정하였다 하더라도 실제 양산 및 배치/운용 단계에서 발생하는 고장 현상은 상이하게 나타날 수 있다. 이러한 오차 범위를 줄이기 위해서는 다양한 장비에 대한 사례 연구를 통해 신뢰성 예측 데이터와 실제 고장 이력 사이의 차이를 분석하고, 필요 시 퍼지 추론 규칙을 결정하는 데 필요한 각 입력 항목 간의 가중치를 조절함으로써 퍼지 추론을 이용한 신뢰성 시험 대상품목 선정 기준을 보완해야 할 것이다.

References

- [1] Defence Acquisition Program Administration, "Defence Acquisition Program Administration Provisions," DAPA instructions, No. 432, 2018 (in Korean).
- [2] Defence Acquisition Program Administration, "Weapon System RAM Work Guidance," DAPA rules, No. 412, 2018 (in Korean).
- [3] Defence Acquisition Program Administration, "ILS Development Guidebook," 2015 (in Korean).
- [4] Defence Acquisition Program Administration, "Weapon System Testing and Evaluation Practice Guidebook," 2013 (in Korean).
- [5] R. Borgovini, S. Pemberton, M. Rossi, "Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)," Reliability Analysis Center, 1993.
- [6] "Research on the TRA (Technology Readiness Assessment) method and practical application of TRA," Security Management Institute, 2011 (in Korean).
- [7] DoD of USA, "Reliability Prediction of Electronic Equipment," MIL-HDBK-217FN2, 1995.
- [8] Y.M. Wang, K.S. Chin, G.K.K. Poon, J.B. Yang, "Risk Evaluation in Failure Mode and Effects Analysis Using Fuzzy Weighted Geometric Mean," Journal of Expert Systems with Applications, Vol. 36, No. 2, pp. 1195-1207, 2009.
- [9] Ministry of national defense, "2016 Defense white paper," 2016 (in Korean).
- [10] Reliability Analysis Center, "Nonelectronic Parts Reliability Data 1995," NPRD-95, 1995.
- [11] DoD of USA, "Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis," MIL-STD-1629AN2, 1984.

Young-Beom Son (손 영 범)

He received M.S degree in electrical engineering from the School of Electronics Engineering, Kyungpook National University in 2017. He is currently a

chief engineer in Hanwha Systems Co., Korea.

Email: yb1126.son@hanwha.com

Jung-Min Yang (양 정 민)

He received Ph.D. degree in electrical engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 1999. He is currently a Professor in

the School of Electronics Engineering, Kyungpook National University.

Email: jmyang@ee.knu.ac.kr