



Received: 2023/08/28
Revised: 2023/09/07
Accepted: 2023/09/21
Published: 2023/09/30

***Corresponding Author:**

Seungsik Min

Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy
PO Box No. 88-4-2, 1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si, Gyeongnam, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5238
Fax: +82-50-4038-7739
E-mail: seaman53@navy.ac.kr

RAMS, FMEA, Survivability 지표 간의 관계성 분석

Analysis of the Relationship Between RAMS, FMEA, and Survivability Indicators

장현애¹, 민승식^{2*}

¹전주대학교 기술경영공학과 조교수

²해군사관학교 기초과학과 부교수

Hyeon-ae Jang¹, Seungsik Min^{2*}

¹Assistant professor, Dept. of Technology Management Engineering, Jeonju University

²Associate professor, Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy

Abstract

본 논문에서는 시스템평가 방법론으로 널리 사용되는 RAMS, FMEA, 생존성(survivability)의 상세 평가 절차와 최근 연구동향에 대해 살펴보고 세 가지 평가방법론 간의 관계성에 대해 논의해 보고자 한다. 먼저 방법론 관점의 경우 시스템의 생애주기 단계별 적용될 수 있는 평가지표에 대해 정리해 보았으며, 평가요소 관점에서는 요소간의 증감 및 네트워크 관계를 분석하였다. 본 연구를 통해 FMEA지표의 발생도, RAMS 지표의 안전도, 생존성 지표의 회복성이 중요한 관리 대상 지표로 나타났다.

This paper examines the detailed evaluation procedures and recent research trends of RAMS, FMEA, and survivability, which are widely used system evaluation methodologies. First, from a methodological perspective, evaluation indicators that can be applied to the system's life cycle stages are summarized. The increase and network relationship between factors are analyzed from the perspective of evaluation factors. This study found that the occurrence rate of FMEA indicators, the safety of RAMS indicators, and the recoverability of survivability indicators are important management indicators.

Keywords

고장모드 및 영향 분석(FMEA), 신뢰성·가용도·정비도·안전도 분석(RAMS), 생존성(Survivability), 연구 동향(Research Trend), 평가방법론(Evaluation Method)

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 해군사관학교 해양연구소 연구비 지원으로 수행된 연구과제임.

1. 서론

체계의 개발단계에서 필수적으로 요구되는 과정 중의 하나가 위험성 평가이다. 그동안 체계의 개발 과정에서 위험을 진단·평가·제거하기 위해 다양한 지표를 개발·사용·확장해 왔다.

먼저 제조 분야의 대표적인 위험평가 방법론으로는 FMEA(failure mode & effects analysis)를 소개할 수 있다. FMEA는 시스템의 신뢰성을 높이기 위해 사전에 치명적인 고장을 식별하여 제거하는 방법론으로 널리 사용되고 있다. 최근에는 ISO26262, IATF16949, 6 시그마 활동에서의 활용 추천 및 품질보증의 일환으로 FMEA를 실시하거나 요구하는 기업이 늘어나고 있다[1]. 국방 및 우주/항공, 교통 분야에서 중요하게 요구되고 있는 위험평가 척도로는 RAMS(reliability, availability, maintainability, safety)가 있다. RAMS는 시스템의 설계, 개발, 운영, 유지보수 전반에 걸쳐 고려되어야 하는 필수적인 지표이다. 마지막으로 무기체계 분야에서 제한적으로 사용되고 있는 생존성(survivability)은 취약성, 회복성, 피격성 세 가지 지표의 조합으로 평가하는 위험평가 척도이다. 생존성이란 어떤 체계가 적대적인 인공환경을 견디어 내고, 지정된 임무를 달성하는데 필요한 능력에서 임무를 실패할 만큼의 손상을 입히지 않을 정도에 대한 척도로 정의된다[2].

본 연구에서는 각 산업 분야에서 활발히 사용되고 있는 세 가지 지

표인 RAMS, FMEA, 생존성 위험성평가 간의 관계성을 분석하여 지표 간 호환성을 파악하고자 한다.

2. 위험성평가대표 지표

2.1 FMEA 연구동향

전통적인 FMEA에서는 위험평가지표로서 RPN(risk priority number)를 사용한다. RPN은 발생도(occurrence), 검출도(detection), 심각도(severity) 세 가지 척도의 곱으로 산출한다. 즉, $RPN = O \times D \times S$ 이다. 이들 세 가지 척도는 각각 1에서 10 사이의 값을 가진다. 예를 들면, $RPN = 9 \times 3 \times 2$ 로 산출될 수 있다. 세 가지 지표를 평가하고 RPN을 산출하는 과정은 다른 지표에 비해 어렵지 않기 때문에 널리 사용되고 있다.

FMEA가 널리 사용되는 방법론인 만큼 관련 연구들도 활발히 진행되고 있다. 2010년부터 2023년 7월까지 구글 학술검색을 기준으로 관련 연구를 찾아보면 FMEA 37,000건, RAM 24,600건, 인공지능 19,100건 순으로 나타났다.

본 연구에서는 최근 국내외 연구 중 FMEA에서 새로운 접근법을 제시한 최근 연구를 중심으로 Table 1과 같이 정리하였다. 연구들의 공통점을 살펴보면 RPN 지표를 보다 직감적이고 정량적인 지표로 산출하기 위한 연구들이 주를 이루고 있었다.

Table 1. FMEA research trends[28]

Categories	Approaches	Literature
Multi-criteria decision making	- AHP/ANP; Fuzzy TOPSIS - Grey theory/Fuzzy set	[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11]
Artificial intelligence	- Machine learning - Fuzzy rule-base system - Data Envelopment Analysis	[12],[13],[14]
Integrated approaches	- Fuzzy AHP-fuzzy TOPSIS; ISM-ANP-UPN - SWARA(stepwise weight assessment ratio analysis) - Linguistic Z number	[15],[16],[17],[18],[19],[20]
Other approaches	- Neutrosophic technique - QFD; Delphi method - AIAG-VDA FMEA - Dempster-Shafer	[1],[2],[21],[22],[28],[23],[24],[25],[26],[33],[27]

산업현장에서 FMEA를 수행하기 위해서는 미국과 독일의 자동차산업협회에서 발간한 FMEA 가이드북(4판)을 주로 적용하고 있다. 2015년부터 제품 안전에 대한 법규 강화로 IATF(International Automotive Task Force)의 주도 하에 AIAG-VDA 통합 FMEA Handbook이 발간되었다[29]. 이에 따라서 자동차 부품사들은 새로운 AIAG-VDA 통합 FMEA를 적용하여 제품개발과 공정설계를 진행해야 제품승인을 받을 수 있게 되었다.

기본적으로 FMEA 연구는 산업과 학계 모두 활발히 이루어지고 있지만, 특정 산업의 경우 표준 가이드북의 적용성이 높은 편이다. 최근 소개된 AIAG-VDA 통합 FMEA의 경우 기존 RPN의 지표 개선¹⁾을 위해 새로운 지표인 AP(Action Priority)를 소개하고 있다. AP는 기존 RPN의 발생도·검출도·심각도의 1에서 10 사이 평가 스케일을 구간별로 나누어 H(높음)-M(중간)-L(낮음) 기준으로 위험을 평가한다.

2.2 RAMS 연구동향

RAMS는 1999년 유럽연합(EU)에서 철도시스템의 신뢰성·가용성·유지보수성·안전성 보장을 위해 유럽 표준 EN 50126을 제정하면서 최초로 사용되었다[30]. 국내에서는 2014년 5월 26일 ‘철도안전법’에 따라 철도 안전관리 체계 기술기준을 제정하면서 RAMS 분석을 법적 요구사항으로 정의하고 있다[31].

RAMS는 신뢰성, 가용성, 유지보수성, 안전성에 대한 4가지 평가척도를 기반으로 시스템의 품질을 정량적으로 평가한다. 첫 번째로, 신뢰성(reliability)은 시스템이 주어진 사용 조건에서 설계된 대로 기능을 수행할 수 있는 능력, 즉 장비가 주어진 조건에서 규정된 기간 동안 요구기능을 수행할 확률이며, 척도로는 고장 간 평균시간(MTBF), 고장 간 평균거리(MDBF)를 사용하고, 식 (1) 및 식 (2)와 같이 산출된다.

· MTBF(mean time between failure)

$$MTBF = \frac{\text{총 운용시간}}{\text{총 고장횟수}} \quad (1)$$

¹⁾ RPN은 1에서 1,000 사이의 값을 가질 수 있으며, 일반적으로 동일한 RPN 값일 경우, 심각도가 높은 고장모드를 우선적으로 조치한다. 또한 RPN 값만으로 위험의 정도를 해석하기 어렵다는 점 등 여러 맹점들이 존재한다.

- MDBF(mean distance between failure)

$$MDBF = \frac{\text{총 운용거리}}{\text{총 고장횟수}} \quad (2)$$

두 번째로, 가용도(availability)는 시스템이 임의의 시점에서 요구되는 기능을 수행할 수 있는 상태에 있을 확률을 의미하며, 운용환경에 따라 고유가용도(A_i), 성취가용도(A_a), 운용가용도(A_o)로 분류된다. 각각의 가용도는 식 (3) - 식 (5)와 같이 산출된다.

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

여기서, MTTR: 평균 수리 시간
(mean time to repair).

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + MCMT + MPMT} \quad (4)$$

여기서, MTBM: 정비 간 평균 시간
(mean time between maintenance),
MCMT: 평균 고장 정비 시간
(mean corrective maintenance time),
MPMT: 평균 예방 정비 시간
(mean preventive maintenance time).

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (5)$$

여기서, MDT: 평균 비가동 시간
(mean down time).

세 번째로, 유지보수성(maintainability)은 규정된 기술 요원과 절차 및 자원을 이용하여 정비를 수행할 때 주어진 시간 내에 요구기능을 수행할 수 있도록 복구할 확률이며, 척도로는 평균 수리 시간(MTTR) 등을 사용하고, 총 고장정비 시간과 총 고장발생 건수를 이용하여 식 (6)과 같이 산출된다.

$$MTTR = \frac{\text{총 고장정비 시간}}{\text{총 고장발생 건수}} \quad (6)$$

마지막으로 안전도(safety)는 시스템의 사용 중에 발생할 수 있는 위험을 예방하고 안전하게 사용할 수 있는 능력을 의미하며, 첫 번째로 대표적인 평가척도는 안전무결성등급(SIL, safety integrity level)으로

IEC 61508에 정의되어 있으며 산업에 따라 서로 다른 SIL 표준을 사용한다. EN50129(철도)에 의하면 SIL 산출을 위해 철도운영사는 허용 가능한 위험율(THR, tolerable hazardous rate)을 정의하여야 한다고 설명하고 있다. 철도운영사가 위험도 수용원칙과 THR을 정의하면, SIL은 Table 2에 의해 할당될 수 있다[32].

Table 2. SIL table proposed in EN50129[32]

Tolerable hazard rate (THR) per hour and per function	Safety integrity level
$10^{-9} \leq THR < 10^{-8}$	SIL 4
$10^{-8} \leq THR < 10^{-7}$	SIL 3
$10^{-7} \leq THR < 10^{-6}$	SIL 2
$10^{-6} \leq THR < 10^{-5}$	SIL 1

두 번째로 PD CLC/TR 50126-2[33]에 의한 위험등급 평가 방식이 있다. 위험등급은 평가 원칙을 기반으로 발생가능성과 심각도의 결합으로 평가할 수 있다. 발생가능성은 산업의 근거를 기반으로 추정 설정되어야 하며, 심각도는 최악의 상황에서 가장 큰 사망자, 중상자, 경상자를 고려하여 결정한다[34]. 발생가능성과 심각도 평가 기준 예시는 Tables 3-4와 같이 제시될 수 있으며, 위험등급은 Table 5를 기준으로 각 위험등급에 따라 '수용가능', '경감수용가능', '수용불가'로 평가한다[35].

Table 3. Example of frequency ranking scheme[41]

Description	Frequency range	Ranking
Frequent	1 in 20 days to 1 in 3 months	6
Probable	1 in 3 months to 1 in $1\frac{1}{4}$ years	5
Occasional	1 in $1\frac{1}{4}$ years to 1 in 7 years	4
Remote	1 in 7 years to 1 in 35 years	3
Improbable	1 in 35 years to 1 in 175 years	2
Incredible	< 1 in 175 years	1

Table 4. Example of severity ranking scheme

Description	Approximate numerical value equivalent fatalities/event	Ranking
Minor injury	0.005	1
More serious injury	0.025	2
Major injury	0.125	3
Single fatality	0.625	4
2 to 5 equivalent fatalities	3.125	5
6 to 25 equivalent fatalities	15.625	6

*1 equivalent fatality = 10 major injuries = 200 minor injuries[42]

Table 5. Risk ranking matrix[41]

Frequency	Severity					
	1	2	3	4	5	6
6	7	8	9	10	11	12
5	6	7	8	9	10	11
4	5	6	7	8	9	10
3	4	5	6	7	8	9
2	3	4	5	6	7	8
1	2	3	4	5	6	7

RAM(S)와 관련된 연구들을 살펴보면 크게 절차 개선 혹은 새로운 지표 개발에 관한 것으로 구분되었다. 본 연구에서는 새로운 지표 개발을 중심으로 하여 최근 연구(2010~2023년), KCI 이상 연구를 살펴보았다. Table 6는 대상시스템을 중심으로 새로운 적용 방법론을 정리한 것이다.

Table 6. RAM(S) research trends

Target system	Approaches	Literature
Weapon	- Simulation-based RAM-C - AHP; Structural equation	[36],[37],[38]
Unmanned aerial vehicle	- Simulation-based RAM-C - RAM verification & validation	[39],[40]
Warship	- ARINC; Correlation analysis	[41],[42]
Railway	- K-means method - Functional block diagram - Bayesian	[43],[44],[45]
General industry	- Heuristic method - Reliability-centered maintenance	[46],[47],[48]

2.3 생존성 연구동향

생존성은 항공우주·에너지·운송 등 여러 분야에서 활용되는 지표이지만 본 연구에서는 전투시스템에 한정하여 생존성을 설명하고자 한다. 생존성은 피격성, 취약성, 회복성 세 가지 평가척도를 기반으로 전시상황을 전제하여 전투시스템을 정량적으로 평가한다. 생존성을 계산하는 식은 세 가지 평가 척도의 곱으로 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{생존성} = 1 - [\text{피격성} \times \text{취약성} \times (1 - \text{회복성})] \quad (7)$$

2.3.1 피격성(susceptibility)

피격성은 적의 탐지기술 및 장비에 대하여 아군의 함정이 식별되어 위협 무기에 의해 피격될 확률을 의미한다. 기본적으로 피격성은 아군의 체계를 탐지하는 장비들의 특성과 성능에 대한 분석과 피격되는 체계의 명중 가능성에 대한 분석으로 구성된다. 본 연구에서는 확률기반 피격성 분석 절차를 간단히 소개한다[49]. 피격확률($P_{\text{피격}}$)은 아군의 체계가 탐지될 확률($P_{\text{탐지}}$)과 탐지 이후 적의 무기로 인해 명중될 확률($P_{\text{명중}}$)로 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{\text{피격}} = P_{\text{탐지}} \times P_{\text{명중}} \quad (8)$$

탐지될 확률($P_{\text{탐지}}$)은 탐지를 위한 최소한의 탐지 한계점인 threshold to noise(T/N) 값과 RCS(radar cross section) 신호 레벨의 잡음 정도를 의미하는 signal to noise ratio(S/N) 값을 기반으로 식 (9)와 같이 산정한다[50].

$$P_{\text{탐지}} = \left[1 + \frac{2(T/N)(S/N)}{2 + (S/N)^2} \right] \cdot e^{-2(T/N)(2+S/N)} \quad (9)$$

이때, S/N과 T/N는 식 (10), 식 (11)과 같이 산출한다.

$$S/N = \frac{P \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4 \cdot k \cdot FT \cdot B_n \cdot L} \quad (10)$$

여기서, P 는 레이더 최고 전력, G 는 안테나 전송 파워, λ 는 신호파장, σ 는 레이더 단면, R 은 radar와 아군의 체계 사이의 거리, k 는 Boltzmann's constant, FT 는

효과온도, B_n 은 레이더 수신기의 신호 대역폭 내에 있는 노이즈 파워, L 은 신호 및 에코 전력 손실 계수로 정의한다[50].

$$T/N = -\ln(P_{false}) \tag{11}$$

여기서, P_{false} (오차확률)는 LFT&E(live fire testing and evaluation)을 통해 얻어지는 데이터를 의미한다.

다음으로 명중될 확률은 아군의 체계가 적의 위협 무기가 피격면적(target area)에 명중될 확률을 의미하며, 위협 무기의 성능에 따라 산정된다. 명중확률은 피격면적에 대한 확률밀도함수의 면적을 명중확률로 산정할 수 있다. 단발 피격에 대한 명중확률은 정규분포 기반의 식 (12) - 식 (15)와 같이 정의될 수 있다[49].

$$P_{\text{단발명중}}(x, y) = P(\text{Length})P(\text{Depth}) = PDF(x)PDF(y) \tag{12}$$

$$PDF(x)PDF(y) = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} P(x)dy \tag{13}$$

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right] dx \tag{14}$$

$$P(y_1 < y < y_2) = \int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(y-\mu)^2}{\sigma^2}\right] dy \tag{15}$$

여기서, x 는 피격면적의 길이 방향, y 는 피격면적의 깊이 방향을 의미한다.

다음으로 다발 피격에 대한 명중확률을 산정할 경우 피격되는 총 파편 수에 따라 명중확률을 결정한다. 먼저 식 (16)과 같이 총 피격 수를 결정하고, 피격면적의 피격 수(x)의 기댓값을 정규분포 기반 식 (17)과 같이 산정한다. 마지막으로 피격 기댓값에 따라서 명중확률($P_{\text{명중}}$)을 식 (18)과 같이 산출한다[51].

$$M = \frac{A_p}{A_c} \cdot K, \quad A_c = \text{range}^2\theta \tag{16}$$

$$E(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{17}$$

$$P_{\text{다발명중}}(H \geq 1) = \sum_{n=1}^n (1 - P_{\text{단발}})^{n-1} \cdot P_{\text{단발}} = 1 - (1 - P_{\text{단발}})^n \tag{18}$$

2.3.2 취약성(vulnerability)

무기체계의 취약성은 적의 위협무기의 피격에 의해 발생하는 손상에 대하여 아군의 무기체계가 견딜 수 있는 능력을 의미한다. 취약성의 평가 절차는 일반적으로 Table 7과 같이 나타낼 수 있으며[52,53], 본 연구에서는 수행 절차 중 취약 확률 산출 방식에 대해서만 비교적 상세히 설명하고자 한다.

Table 7. The procedure for vulnerability assessment

Step	Description
Weapon system analysis	Threat weapons specification and mission & kill type
Critical component analysis	FMEA and FTA (fault tree analysis)
Vulnerability assessment	Component definition; Calculation of the number of hits; Determination of penetration; Calculation of vulnerability probability

취약성은 구성품의 취약면적 또는 취약 확률값을 이용한다. 구성품의 취약면적은 손상함수를 이용하여 산출할 수 있다[54]. 취약 확률값의 경우, 현실성이 반영된 다중 피격상황을 고려할 때 이항식 접근방법, 포아송 접근방법, Tree-Diagram 방법, Markov Chain 방법을 적용할 수 있다[53].

본 연구에서는 칼튼 손상함수 기반 취약 확률 산출 방법을 간단히 소개하고자 한다. 칼튼 손상함수를 기반으로, 단일 피격체의 단방향 손상확률(SSPD: Sing Sortie probability of damage)은 피격체에 정확한 타격이 가해지는 정확성 척도의 확률밀도함수($g(x)$)와 1차원 칼튼 손상함수($c(x)$)의 적분으로 정의할 수 있다. 피격체의 수평 방향과 수직 방향의 형상을 고려한 단일 피격체의 x 방향 및 y 방향 손상확률(SSPD)은 각각 식(19), 식 (20)과 같다.

$$SSPD_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{4x^2}{L_{ET}^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) dx \tag{19}$$

$$SSPD_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{4y^2}{W_{ET}^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) dy \tag{20}$$

$$L'_{ET} = 2 \times WR_r = 1.128\sqrt{MAE_F \times a} \quad (21)$$

$$W'_{ET} = 2 \times WR_d = \frac{L'_{ET}}{a} \quad (22)$$

여기서, WR_r 과 WR_d 는 위협 무기의 반경을 의미하며, L'_{ET} 와 W'_{ET} 는 피격체에 나타난 손상확률 분포의 유효 등가 폭(deflection) 및 등가 높이(range)를 의미한다.

위협 상황에서 오차거리를 포함하여 2차원 평면상에 대한 손상확률(SSPD)은 식 (23)과 같이 각 방향에서 손상확률의 곱으로 표현할 수 있다[55].

$$SSPD = SSPD_x \times SSPD_y \quad (23)$$

따라서 손상확률($SSPD_x$, $SSPD_y$)을 이용하면 투영면적(A_p)으로부터 취약면적(A_w)을 식 (24)와 같이 산출가능하다.

$$A_w = SSPD \times A_p \quad (24)$$

2.3.3 회복성(recoverability)

회복성은 피격 후 함정 또는 구성품 손상 시 설계된 임무 수행을 지속하기 위한 회복능력을 의미하므로 함정 및 구성품의 회복능력을 평가한다[52]. 회복성을 평가하기 위한 방법론으로는 RAM 분석, 복원력 분석, 안전성분석 등이 있으며, 대표적으로 RAM 분석을 많이 사용하고 있다[52,53,56].

RAM 분석의 경우 S/W 사용이 일반적이며, 구성품의 구조분석(FTA) 후 MTTR 및 MTBF값을 기반으로 평가한다(2.2절 참고). 복원력 분석의 경우에도 체계의 손상상태를 S/W기반으로 모델링하여 복원력을 평가한다.

2.3.4 생존성 최근 연구동향

생존성과 관련된 국내 최근 연구(2010~2023년)를 살펴보면 대다수가 평가절차 및 생존성 향상 연구이다. 생존성 연구는 많지 않은 관계로 국내 발표 연구를 포함하여 Table 8과 같이 대상시스템과 접근법을 중심으로 정리하였다.

Table 8. Survivability research trends

Target system	Approaches	Literature
Warship	- NORAM S/W; 2D simulator - MAW(missile approach warning); genetic algorithm	[56],[57],[58],[68],[59],[60]
Unmanned aerial vehicle	- Random variable weight conversion method; - Hazard distance assessment technique; - Most reliable path problem	[61],[62],[63],[64]

3. FMEA, RAMS, 생존성의 관계 분석

3.1 생애주기별 위험성 평가 방법론 제시

본 절에서는 FMEA, RAMS, 생존성 평가 지표를 시스템의 생애주기 관점에서 논하고자 한다. Fig. 1은 생애주기에 따라 적용되는 방법론을 절차별로 도시한 것이다.

시스템의 생애주기를 크게 설계-운영-전시상황-폐기로 구분할 때, 일반적으로 설계 단계 동안 가장 많은 분석이 이루어진다. 체계의 구성품 단위에서 FMEA 분석(①)을 실시하여 설계 단계에서 식별 가능한 모든 잠재적 고장모드를 제거한다. 이때, FMEA 분석은 시스템의 구조적 계층을 고려하여 다양한 도구(FTA, ETA 등)와 함께 여러 차례 수행된다. 이 과정을 통해 무기체계의 생존성 향상(②)을 위한 설계로 변경된다. 다음으로 RAM 분석(③)을 통해 목표값 달성 여부를 확인한다. 두 번째, 체계의 운영 단계에서는 치명적 고장을 사전에 제거하기 위해 FMEA 및 RAMS 분석을 수행한다. 평소에는 FMEA 분석(⑤)을 통해 고장을 제거하고 RAMS 분석(④)을 통해 체계의 목표값을 관리한다. 다음으로 무기체계는 전시상황을 대비하여 주기적으로 생존성 관련 검사(⑥)를 받는다. 마지막으로 체계는 정기적 성능분석(⑦)을 통해 폐기 여부가 결정된다.

세 가지 방법론을 계층적으로 구분해 보면, FMEA는 체계의 구성품(㉟)을 대상으로 수행되고, 나머지 방법론은 체계 전체(㉠)를 중심으로 적용된다고 볼 수 있다. Fig. 1을 정리해 보면, 체계는 생애주기별 분석 절차를 통해 관리 및 폐기되며 절차별 분석 기록은 새로운 체계 개발의 매우 중요한 자료이므로 체계적 관리와 적

극적 활용이 필요하다. 최근 들어 국방 분야에도 빅데이터 개념이 중요시되고 있으므로 Fig. 1과 같은 생애주기별 통합 데이터 관리시스템의 도입이 시급할 것으로 판단된다.

3.2 위험성 평가 요소 간의 관계 분석

앞서 논의한 FMEA, RAMS, 생존성 등 3가지 평가 지표와 이들 지표를 구성하는 요소들은 서로 연관되어 있다. 하지만 이들 평가요소 간의 관계를 구체적으로

연구한 사례는 찾아보기 어렵다. 앞서 생애주기별 평가 방법론을 논의하였는데, 구성요소 간의 관계를 파악한다면 각 지표들을 산출하는 데에 필요한 노력과 비용을 절감할 수 있을 것이다. 이는 유효데이터의 수집을 이증으로 수행할 필요가 없고 수집된 데이터 간에 논리적인 관계를 고민할 필요가 없기 때문이다.

Table 9은 각각 FMEA, RAMS, 생존성 요소들이 증가할 때 다른 요소들의 증감을 표시한 것이다. 가령, FMEA 요소들로부터 RAMS 요소, 생존성 요소가 받는 영향은 다음과 같다.

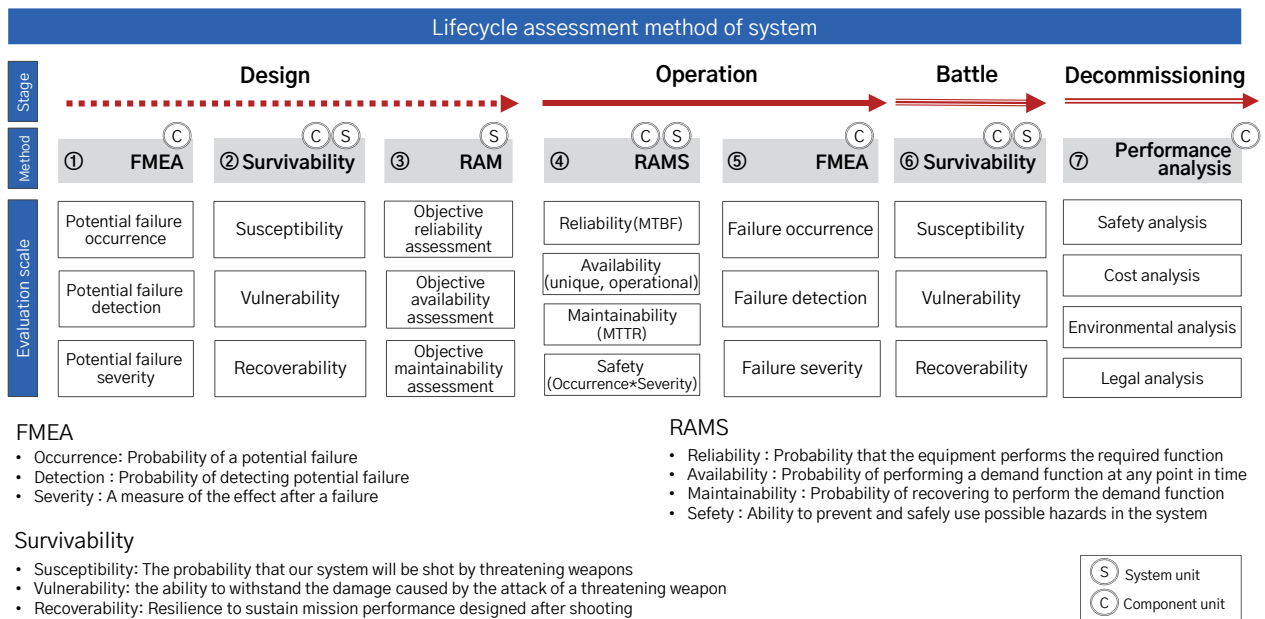


Fig. 1. Evaluation methodology by system life cycle

Table 9. Relations among FMEA, RAMS and survivability

Methods of system evaluation	FMEA	RAMS	Survivability
FMEA			
Occurrence ↑	-	Reliability ↓, Availability ↓, Safety ↓	Susceptibility ↑
Detection ↑	-	Availability ↑, Maintainability ↑	Recoverability ↑
Severity ↑	-	Safety ↓	Vulnerability ↑, Recoverability ↓
RAMS			
Reliability ↑	Occurrence ↓	-	Susceptibility ↓
Availability ↑	Occurrence ↓, Detection ↑	-	Susceptibility ↓, Recoverability ↑
Maintainability ↑	Detection ↑	-	Recoverability ↑
Safety ↑	Occurrence ↓, Severity ↓	-	Susceptibility ↓, Vulnerability ↓, Recoverability ↑
Survivability			
Susceptibility ↑	Occurrence ↑	Reliability ↓, Availability ↓, Safety ↓	-
Vulnerability ↑	Severity ↑	Safety ↓	-
Recoverability ↑	Detection ↑, Severity ↓	Availability ↑, Maintainability ↑, Safety ↑	-

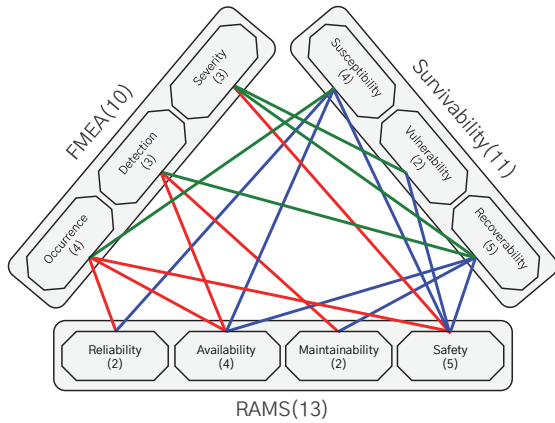


Fig. 2. Relations among FMEA, RAMS, and survivability (centered on RAMS)

- FMEA-RAMS
 - 발생도: 고장 발생이 늘어나면 장비의 신뢰도와 가용도, 안전도가 줄어든다.
 - 검출도: 발생한 고장의 검출 능력이 늘어나면 정비도가 늘어나고 가용도가 늘어난다.
 - 심각도: 장비의 고장이 체계에 심각한 영향을 미치면 안전도 역시 낮아진다.
- FMEA-생존성
 - 발생도: 고장 발생이 늘어나면 무기체계의 피격성이 늘어난다.
 - 검출도: 발생한 고장의 검출 능력이 늘어나면 무기체계의 회복성이 늘어난다.
 - 심각도: 장비의 고장이 무기체계에 심각한 영향을 미치면 취약성이 증대되고 회복성이 낮아진다.

Fig. 2는 Table 9을 바탕으로 FMEA, RAMS, 생존성 요소들 간의 관계를 네트워크로 나타낸 것이다. FMEA와 RAMS 사이에는 빨간색 링크, RAMS와 생존성 사이에는 파란색 링크, 생존성과 FMEA 사이에는 초록색 링크로 표시하였으며, 항목에 표시된 숫자는 링크의 수이다. 이때 총 링크의 수는 각 노드에 연결된 링크 수의 합을 2로 나누면 된다. FMEA에서는 발생도(4)가, RAMS에서는 안전도(5)가, 생존성에서는 회복성(5)이 가장 많은 링크를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 물론, Fig. 2는 각각의 링크에 가중치를 부여하지 않은 네트워크이기 때문에 링크의 수만으로 노드들의 중요성을 비교하는 것은 무리가 있다. 하지만 단순 비교했을 때 FMEA의 발생도, RAMS의 안전도, 생존성의

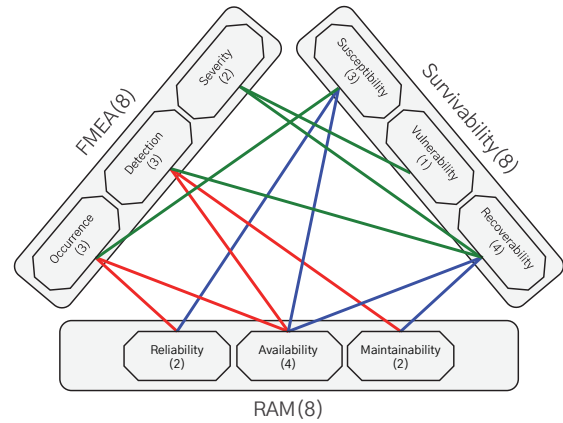


Fig. 3. Relations among FMEA, RAMS, and survivability (centered on RAM)

회복성을 측정하는 것이 다른 요소들을 추정하는 데에 바탕이 될 것임을 추정할 수 있다. 특히, RAMS의 안전도 항목과 생존성의 회복성 항목은 가능한 총 연결 수인 6개 중 1개씩만 제외하고 5개가 모두 연결되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3는 본 논문에서 다루고 있는 RAMS(reliability, availability, maintainability, and safety)에서 안전도(safety)를 제외한 고전적인 RAM(reliability, availability, and maintainability) 요소들 간의 관계를 네트워크로 나타낸 것이다. Fig. 2의 총 링크 수는 17개였으나, Fig. 3에서는 12개로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이처럼 RAMS의 안전도는 위험성 평가 요소들 중에서도 중요한 역할을 하고 있으므로 향후 RAM 목표값 분석 시에는 안전도 역시 고려할 필요가 있을 것이다.

4. 결론

지금까지 무기체계 개발 및 운용 단계에서 많이 사용되는 위험평 평가지표인 FMEA, RAMS, 그리고 생존성에 관한 연구동향 조사, 생애주기별 평가 방법론, 그리고 평가요소 간의 관계성을 살펴보았다.

먼저 FMEA 연구동향을 살펴보면 Fuzzy 이론과 AI를 적용한 연구들이 최근 주류를 이루는 것으로 나타났으며, RAMS의 경우는 몇몇 연구자들이 국내 철도 분야에서 효율적 적용 절차들을 주로 연구하였고, 함정 및 항공기 분야에서 RAM을 중심으로 연구하는 것으로 나타났다. 생존성의 경우는 학회 발표를 포함해서 대부분의 연구가 평가 절차를 개선하는 것으로 나타났으며, 몇몇 연구만이 생존성 향상 연구를 수행하였다.

4IR 시대 최첨단 기술이 국방 분야에 접목되면서 지금보다 활발한 RAMS와 생존성 향상 연구가 수행되기를 기대한다.

다음으로, 위험성 평가 지표들은 체계의 생애주기에 따라 필요한 항목들이 달라지는데 본 연구에서는 생애주기를 설계-운영-전시상황-폐기로 구분하여 분석하였다(Fig. 1 참조). 설계 단계에서는 개발되는 체계의 위험성을 기준치 이하로 낮추기 위하여 FMEA, 생존성, RAM 분석이 필요할 것이다. 체계 양산 후 평시 운영 단계에서는 치명적 고장을 사전에 제거하기 위해 FMEA 및 RAMS 분석을 수행한다. 전시 운영 단계에서는 체계의 생존성 분석 수행이 필요하다. 마지막으로 체계는 정기적 성능분석을 통해 폐기 여부가 결정된다. 세 가지 방법론을 계층적으로 구분해 보면, FMEA는 체계의 구성품(©)을 대상으로 수행되고, 나머지 방법론은 체계 전체(Ⓢ)를 중심으로 적용된다고 볼 수 있다.

한편, 이들 요소를 측정하기 위해서는 많은 비용이 소요되는데, 각 성분들 간의 관계를 고려하면 분석 비용을 절감할 수 있다. 본 연구에서는, FMEA 구성요소의 증감이 RAMS와 생존성 요소들의 증감을 유도하는 상황을 추정하여 각 요소들이 관계성을 갖는지를 판단하였다. 그 결과, FMEA 지표의 발생도(4개 항목과 관계), RAMS 지표의 안전도(5개 항목과 관계), 생존성 지표의 회복성(5개 항목과 관계)이 주요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Ahn, D. G., J. M. Yoo and J. S. Jang, "How to Perform FMEA Effectively for Weapon System Development Stage," *Journal of Applied Reliability*, 2021, pp. 45-60.
- [2] 나성현, 소희섭, "Dempster-Shafer 증거 이론을 이용한 회전의 항공기 착륙장치의 FMEA," *한국산학기술학회 논문지*, 2021, pp. 76-84.
- [3] Braglia, M., "MAFMA: Multi-attribute Failure Mode Analysis," *Int J Qual & Reliability Mgmt*, 2000, pp. 1017-1033.
- [4] Carmignani, G., "An Integrated Structural Framework to Cost-based FMECA: The Priority-cost FMECA," 2009, pp. 861-871.
- [5] Zammori, F. and R. Gabbriellini, "ANP/RPN: A Multi Criteria Evaluation of the Risk Priority Number," *Quality and Reliability Engineering International*, 2012, pp. 85-104.
- [6] Anand Pillay and Jin Wang, "Modified Failure Mode and Effects Analysis Using Approximate Reasoning," 2003, pp. 69-85.
- [7] Yu, Y., J. Yang and S. Wu, "A Novel FMEA approach for Submarine Pipeline Risk Analysis Based on IMFRN and ExpTODIM-PROMETHEE-II," *Applied Soft Computing*, 2023, 110065.
- [8] Ouyang, L., Y. Che, L. Yan and C. Park, "Multiple Perspectives on Analyzing Risk Factors in FMEA," *Computers in Industry*, 2022, 103712.
- [9] Qiu, Y. and H. Zhang, "A Modified FMEA Approach to Predict Job Shop Disturbance," *Processes*, 2022, 2223.
- [10] Kim, S. and C. Kim, "A Study on the Implementation Method of P-FMEA Considering Easiness of Improvement," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2022, pp. 644-653.
- [11] 나성현, 이광은, "회전의 항공기 착륙장치에 대한 퍼지 FMEA," *한국산학기술학회 논문지*, 2021, pp. 751-758.
- [12] Liu, J., D. Wang, Q. Lin and M. Deng, "Risk Assessment Based on FMEA Combining DEA and Cloud Model: A Case Application in Robot-assisted Rehabilitation," *Expert Systems with Applications*, 2023, 119119.
- [13] Peddi, S., K. Lanka and P. Gopal, "Modified FMEA Using Machine Learning for Food Supply Chain," *Materials Today: Proceedings*, 2023, .
- [14] You, J., S. Lou, R. Mao and T. Xu, "An Improved FMEA Quality Risk Assessment Framework for Enterprise Data Assets," *Journal of Digital Economy*, 2022, pp. 141-152.
- [15] Wen-Sheng Xiao, Chao Liu, Guang-Xin Li and Jian Liu, "Reliability Analysis of Subsea Control System Using FMEA and FFTA," 2023, .
- [16] Memarpour Ghiaci, A. and S. Jafarzadeh Ghouschi, "Assessment of Barriers to IoT-enabled Circular Economy Using an Extended Decision-making-based FMEA model Under Uncertain Environment," *Internet of Things*, 2023, pp. 100719.
- [17] Lin, S. and H. Lo, "An FMEA Model for Risk Assessment of University Sustainability: Using a Combined ITARA with TOPSIS-AL Approach Based Neutrosophic Sets," *Annals of Operations Research*, 2023, pp. 1-27.
- [18] Liang, R., Z. Z. Xue, X. Wei and R. Li, "Research on Risk Evaluation of Logistics Park Construction Project by FMEA Based on Hesitation Environment," *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 2022, pp. 072015.
- [19] Liou, J. J. H., P. C. Y. Liu, S. Luo, H. Lo and Y. Wu, "A Hybrid Model Integrating FMEA and HFACS to Assess the Risk of Inter-city Bus Accidents," *Complex & Intelligent Systems*, 2022, pp. 2451-2470.
- [20] Ahn, D. G., J. H. Choi and J. S. Jang, "How to Perform Process FMEA Effectively," *Journal of Applied Reliability*, 2021, pp. 131-143.
- [21] Ceylan, B. O., D. A. Akyar and M. S. Celik, "A novel FMEA Approach for Risk Assessment of Air Pollution from Ships," *Marine Policy*, 2023, 105536.
- [22] Shixin Jiang, Zhenguo Liu and Jieyu Chen, "A Dynamic Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Method for CNC Machine Tool in Service," *Journal of Physics: Conference Series*.

IOP Publishing, 2023, 012047.

- [23] Chen, W., B. Yang and Y. Liu, "An Integrated QFD and FMEA Approach to Identify Risky Components of Products," *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 101808.
- [24] Ebrahimi, S., K. Vachal and J. Szmerekovsky, "A Delphi-FMEA Model to Assess County-level Speeding Crash Risk in North Dakota," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2022, 100688.
- [25] 조성우, 이한솔, 강주영, "위험 요인 평가를 위한 FMEA의 일반 RPN 모형과 활용에 관한 연구," *한국품질경영학회지*, 2022, pp. 125-138.
- [26] Yoo, J., D. Ahn, J. Choi, J. Cho, S. Cho and J. Jang, "FMEA Implementation Based on Design Activities," *Journal of Applied Reliability*, 2022, pp. 292-307.
- [27] 오왕성, 구정서, "RCM 절차에서 시스템 신뢰성과 유지보수 신뢰성에 대한 FMEA 적용의 비교연구," *한국철도학회논문집*, 2021, pp. 861-875.
- [28] Hu-Chen Liu, Long Liu and Nan Liu, "Risk Evaluation Approaches in Failure Mode and Effects Analysis: A Literature Review," *Expert Systems with Applications*, 2013, pp. 828-838.
- [29] AIAG & VDA, "Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Handbook," 2019.
- [30] EN. "BSI Standards Publication Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)," 2017.
- [31] 국토교통부, "철도안전관리체계 기술기준 제정 고시문," 2014.
- [32] EN. "Railway Application – Communication, Signaling and Processing Systems – Safety Related Electronic Systems for Signaling," 2003.
- [33] EN. "The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), Part 2: Guide to the Application of EN50126-1 for Safety," 2007.
- [34] 국토교통부, "철도 위험도 평가에 관한 세부기준," 2023.
- [35] Kim, J., D. Jeong, J. Lee, J. Jeon and K. Shin, "A Study on Maintenance Management Based on RAMS for Railroad Systems," *Journal of the Korean Society for Railway*, 2017, pp. 713-725.
- [36] Jung, S., J. Ha, H. Do and J. Kim, "PBL System Linkage Plan Using RAM-C analysis Tool According to the Total Life Cycle Management Task Enactment," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2023, pp. 67-73.
- [37] Han, S. and S. Paik, "RAM Goal-setting Using the AHP and Field Data of Similar Weapon Systems," *Journal of Applied Reliability*, 2020, pp. 154-162.
- [38] Kim, I. S. and W. Jung, "Comparative Analysis of RAM Value Correction Method Based on the Evaluation of the Weapon System Staff," *Journal of Applied Reliability*, 2019, pp. 374-381.
- [39] Sung-Chul Ha and Seung-Jin Han, "Study on RAM Analysis Process for Air Force Weapon System Based on Field Data," 2022, p. 227.
- [40] Choi, C. H., J. K. Bang and S. S. Park, "A Research of Applying RAM-c to Analyze the Design Service Life for Unmanned Aerial Vehicle," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 2015, pp. 117-124.
- [41] Jo, E., Y. Jung and Y. Kim, "A Study on the Reliability Allocation for Warship Weapon System Using Field Data RAM Analysis Results," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2023, pp. 439-447.
- [42] Jo, E., Y. Jung and S. Ha, "A Study on the Correlation Between Warship Displacement and Reliability Using Field Data RAM Analysis Results," *Journal of Applied Reliability*, 2023, pp. 89-96.
- [43] Zhang, Z., L. Jia and Y. Qin, "RAMS Analysis of Railway Network: Model Development and a Case Study in China," *Smart and Resilient Transportation*, 2021, pp. 2-11.
- [44] 최성호, 김길동, 구정서, "운영기반의 철도시스템 RAMS 성능 요구사항 설계에 관한 연구," *전기학회논문지*, 2018, pp. 1549-1554.
- [45] 임종국, 이희성, "철도차량 주요장치의 RAM 분석방법 개선 및 수명예측 방안 연구," *한국철도학회 논문집*, 2021, pp. 1031-1038.
- [46] Mohammed Taleb-Berrouane, Faisal Khan and Mohammad Kamil, "Dynamic RAMS Analysis Using Advanced Probabilistic Approach," *Chemical Engineering Transactions*, 2019.
- [47] Han, Y., H. Kim, W. Yun and J. Kim, "Heuristic Method for RAM Design of Multifunctional System," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers – A*, 2012, pp. 157-164.
- [48] De Sanctis, I., C. Paciarotti and O. Di Giovine, "Integration Between RCM and RAM: A Case Study," *The International Journal of Quality & Reliability Management*, 2016, pp. 852-880.
- [49] 김광식, 이장현, 황세윤, 반일환, "확률밀도함수(PDF)를 이용한 함정 피격성 분석 기법 연구," (사)한국CDE학회, 2014, pp. 1161-1166.
- [50] N. Otsin. "Development of a Combat Aircraft Operation and Cost-Effectiveness Design Methodology," 2005.
- [51] Driels, M., "Weaponneering: Conventional Weapon System Effectiveness," *AIAA Education Series*, Virginia, USA, 2004.
- [52] 김광식, 이장현, "함정 통합 생존성 분석을 위한 절차 모델," *대한조선학회*, 2011.
- [53] 김광식, 이장현, 손금준, 전정익, "함정 통합 생존성 분석을 위한 절차적 방법론 연구," (사)한국CDE학회, 2012.
- [54] 이장현, 최원준, "칼트 손상함수를 이용한 주요장비의 취약 면적 산정과 함정 취약성 평가 방법," *대한조선학회 논문집*, 2018, pp. 274-280.
- [55] Morris R. Driels. "Determining the Number of Iterations for Monte Carlo Simulations of Weapon Effectiveness," 2004.
- [56] 김광식, 이장현, "다중 관통 피격에 따른 함정 통합 생존성 분석 절차," *한국해양공학회지*, 2014, pp. 69-76.
- [57] 정진욱, 정용국, 주수현, 신종계, 김종철, "함정 초기 설계 단계에서 레이아웃 설계 시 생존성을 고려하기 위한 간이 평가 방법과 애플리케이션," *대한조선학회 논문집*, 2018, pp. 9-21.
- [58] Choi, S. and D. Park, "A Study on Securing Ship Survivability focused on a Cost and Effectiveness Analysis for

Air Defense Performance,” Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2014, pp. 2579-2586.

[59] Lee, S., H. Song, O. Jang, J. Kim and S. Kim, “Optimal Path Technique for the Purpose of Overlapping to Improve Survival,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2023, pp. 294-300.

[60] 주수현, 김영민, 정용국, 신종계, “생존성 기반의 함정 격실 배치 알고리즘 및 응용 방안,” (사)한국CDE학회, 한국ADCAM학회, 2014 동계학술대회 논문집.

[61] Yang, J., K. Lee and C. Jee, “Aircraft Combat

Survivability Analysis Based on the Random Variable Weighted Score Algorithm,” Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 2013, pp. 883-890.

[62] 배지열, 정대윤, 조형희, 김지혁, 배형모, “공대공 적외선 위협에 대한 회피기동이 항공기 생존성에 미치는 영향,” 한국전산구조공학회논문집, 2017, pp. 501-506.

[63] 박서현, 차재룡, “무인항공기의 생존성 향상을 위한 항재밍 기법 구현 및 검증,” 한국통신학회논문지, 2021, pp. 540-548.

[64] 배민지, “무인항공기의 생존성을 고려한 감시정찰 임무 경로 계획“, 한국산학기술학회, 2019, pp. 211-217.