

무기체계의 안전 설계를 위한 DFMEA 적용에 관한 연구

서양우*, 오영일, 김희욱, 김소정
LIG넥스원 PGM IPS연구소

A Study on the Application of DFMEA for Safety Design of Weapon System

Yang Woo Seo*, Young Il Oh, Hee Wook Kim, So Jung Kim
Precision Guided Munition Integrated Product Support R&D Lab, LIG Nex1

Abstract : In this paper, we proposed the DFMEA Implementation Method for safety design of Weapon System. First, we presented the process for DFMEA. And then, the case analysis of OOO missile was performed in accordance with the process presented. After defining the system requirements of OOO missile, failure definition scoring criteria was set. In order to clarify the definition of failure, the failure was classified into safety, reliability, maintainability and others. After performing the function analysis, the relationship matrix analysis was performed to identify the failure mode according to the function without omission. After clarifying the failure classification, mode of failure, cause of failure and effect were analyzed to calculate the severity, occurrence and detection values. After the action priority was judged, the recommended action according to the failure classification was identified for the determined action priority. The results of this study can be used as a relevant basis for the design reflection and resource re-allocation of stakeholders.

Key Words : DFMEA, Severity, Occurrence, Detection, Weapon System, Safety

Received: March 21, 2022 / **Revised:** June 16, 2022 / **Accepted:** June 20, 2022

* 교신저자 : Yang Woo Seo / PGM IPS R&D Lab, LIG Nex1/ yangwoo.seo2@lignex1.com

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

1. 서론

무기체계의 운용유지단계에서 안전성을 확보하기 위해서는 설계 초기단계부터 안전성 설계에 대한 적합성을 검토하고, 잠재적 고장에 대한 사전 예측 및 대책을 수립하는 것이 중요하다. 즉, 발생가능한 모든 고장모드 및 고장영향을 정의하고, 효과적인 조치계획을 수립해야 한다. 설계 고장모드 및 영향 분석(DFMEA; Design Failure Mode and Effects Analysis)은 가능한 한 고장모드와 관련 원인/메커니즘이 고려되고 다루어졌는지 확인하기 위한 수단으로 주로 설계 엔지니어/팀에 의해 사용되는 분석 기법이다.[1] 이를 통해 잠재적 위험성과 관련 있는 고장모드의 위험도, 발생도 등을 추정하여 위험 우선순위가 높은 품목을 관리하여 사전에 고장을 방지해야 한다. 탐색 및 체계개발 단계에서 실제 설계 비용은 전체 대비 15% 밖에 차지하지 않지만, 실제 영향력은 88%를 차지하고 있다.[2] 시스템 생명주기 프로세스 중 설계 프로세스는 아키텍처 정의에서 표현된 내용과 일치하는 구현이 이루어지도록 상세 데이터와 정보를 제공하는 데 있다.[3] DFMEA는 상세설계 단계에서 부품선정 이후부터 적용되며, 시스템이나 기기의 잠재적인 고장모드를 찾아내어 시스템이나 기기에 영향을 미치는 고장모드에 적절한 대책을 세움으로써 고장을 미연에 방지할 수 있도록 분석되어야 한다. DFMEA는 구성품 점검 수준의 결정, 고장 진단 및 신뢰성 시험 항목 결정 등을 위한 설계 프로세스 중에 신뢰성 기준 달성을 위해 반드시 수행해야 하는 핵심 활동이다. 이에 따라, 설계에 초점을 맞춘 DFMEA를 적용한 결과를 설계검토 회의에서 최적의 설계가 진행될 수 있도록 해야 한다.

기존 연구사례를 살펴보면, Ahn et al.[4]은 FMEA를 효과적으로 실시할 수 있는 고장모드 및 고장 메커니즘 도출을 강조한 절차를 제안하였고, Kim et al.[5]은 무기체계 설계품질 향상을 위한 DFMEA 적용방안을 제시하였고, Park et al.[6]은 기능 FMEA를 활용한 무기체계개발 초기단계에서

의 설계반영 방안을 제시하였다. 한편, Kim et al.[7]은 FMEA 수행 시 위험 우선순위(RPN; Risk Priority Number) 평가의 문제점들을 분석하여 평가기준을 단순화하고 재정립하였다. Lee et al.[8]은 K21 장비에 FMEA를 적용한 후 위험 RPN 평가 시 평가기준을 재구성하여 평가기준의 모호성이 개선되도록 하였다. Lee et al.[9]는 초기 양산 단계의 데이터를 활용하여 발생도 등급을 선정 및 조정하는 방안을 제안하였다. Shin et al.[10]은 가압중수로 증기발생기의 안전성을 평가할 수 있는 체계를 수립하였고, Kim et al.[11]은 작업자와 이동 장비의 위치 파악을 통한 스마트 안전관리 시스템의 기본 설계를 수립하였다.

위 사례들은 안전성 설계를 고려하지 않은 FMEA 수행 및 안전성 평가 및 시스템 설계를 수행한 사례들이다. 즉, DFMEA 수행 시 고장 분류를 명확하게 설정하지 않고서 수행하였다. 고장 분류를 신뢰성, 정비성 뿐만 아니라 안전성을 포함하여 권고조치 대상품목 수준을 결정할 필요가 있다. 안전성 설계라 함은 안전과 관련된 설계, 점검장비를 활용한 점검 시에 안전, 운용 절차 시 발사 전/후의 안전, 훈련 절차 시 실장비와의 물리적/기능적 차단에 관한 안전 등을 관리 대상으로 하여 설계에 반영하는 것을 의미한다.

또한, RPN 평가 방법에 있어서 위험 우선순위에 따른 조치 순위 및 범위를 결정하기 어렵기 때문에 객관성을 보장할 수 있는 명확한 근거를 마련해야 한다.

위 사항들을 반영하여 본 논문에서는 무기체계의 안전 설계를 위한 DFMEA 적용 방안을 제시하고자 한다. 이에 따라, 본 논문에서는 안전성 설계를 수행할 수 있도록 고장분류 및 권고조치 사항 결정 활동을 추가한 절차를 제시한다. 또한, 사례 분석을 통해 설계 우선순위 판단에 그치지 않고서 설계반영 수행 범위를 제시한다.

2. DFMEA

2.1 DFMEA 개요

DFMEA는 설계 초기 단계에 시작하여 양산도면 출도 이전에 완성되어야 하며, 제품의 구성요소인 부품, 어셈블리, 시스템의 단계별 분석에 사용된다. 제품의 잠재적 고장모드의 확인이 용이하며, Top-down 또는 Bottom-up 방식으로 분석한다. 발생가능한 모든 고장모드와 고장영향을 정의해야 하며, 이를 근간으로 관련 대책을 효과적으로 수립해야 한다. DFMEA는 잠재적 위험성과 관련 있는 고장모드에 대해서 각 고장모드의 심각도, 발생도 및 검출도를 추정하여 종합적인 중요도를 고려하여 필요한 권고조치사항을 결정하는데 효과적이다.

2.2 위험도 분석 척도

위험도 분석 척도에는 심각도 S(Severity), 발생도 O(Occurrence) 및 검출도 D(Detection)로 구성된다. 위험 우선순위 산출 시에 각각의 척도들을 활용하여 리스크를 평가할 수 있다.

2.2.1 심각도

표 1의 심각도 등급은 주어진 고장모드에 대한 가장 심각한 고장 영향과 관련된 척도이다.[12] 고장모드가 예고 없이 발생하는 경우는 10점을 부여하고, 영향 없을 때는 1점을 부여한다.

<Table 1> Severity Classification[12]

Effect	Criteria	Rank-ing
Hazardous without warning	Affects safety or environment or noncompliance in regulations, Failure mode occur without notice.	10
Hazardous with warning	Affects safety or environment or noncompliance in regulations, there is a warning about the occurrence of the failure mode.	9
Very High	System/parts inoperable due to loss of main function.	8

High	System/parts operating with poor performance, Customer very dissatisfied.	7
Moderate	System/parts operable, but customer inconvenience due to inoperable convenience item.	6
Low	System/parts operable, but some of the customers inconvenience due to performance of convenience item is poor.	5
Very Low	Inappropriate finish/noise items, defect noticed by most customers.	4
Minor	Inappropriate finish/noise items, defect noticed by average of customers.	3
Very Minor	Inappropriate finish/noise items, defect noticed by discriminating customers.	2
None	No discernible defect.	1

2.2.2 발생도

표 2의 발생도 등급은 예방 통제의 효율성과 관련된 척도이다.[12] 고장 발생이 가장 높은 경우는 10점을 부여하고, 가장 낮은 경우는 1점을 부여한다.

<Table 2> Occurrence Evaluation Criteria[12]

Probability of failure	CNF/1,000	Percentage of possible failures	Rank-ing
Very High: Failure is almost inevitable	> 316	greater than 1 in 2	10
	316	1 in 3	9
High: Repeated failures	134	1 in 8	8
	46	1 in 20	7
Moderate: Occasional failures	12.4	1 in 80	6
	2.7	1 in 400	5
	0.46	1 in 2,000	4
Low: Relatively few failures	0.063	1 in 15,000	3
	0.0068	1 in 150,000	2
Remote: Failure is unlikely	< 0.00058	less than 1 in 1,500,000	1

2.2.3 검출도

표 3의 검출도 등급은 제품이 출시되기 전에 고장 원인 또는 고장모드를 입증하기 위한 탐지제어 효율성과 관련된 척도이다.[12] 검출할 수 없을 경우 10점을 부여하고, 검출 가능성이 매우 확실한 경우 1을 부여한다.

<Table 3> Detection Evaluation Criteria[12]

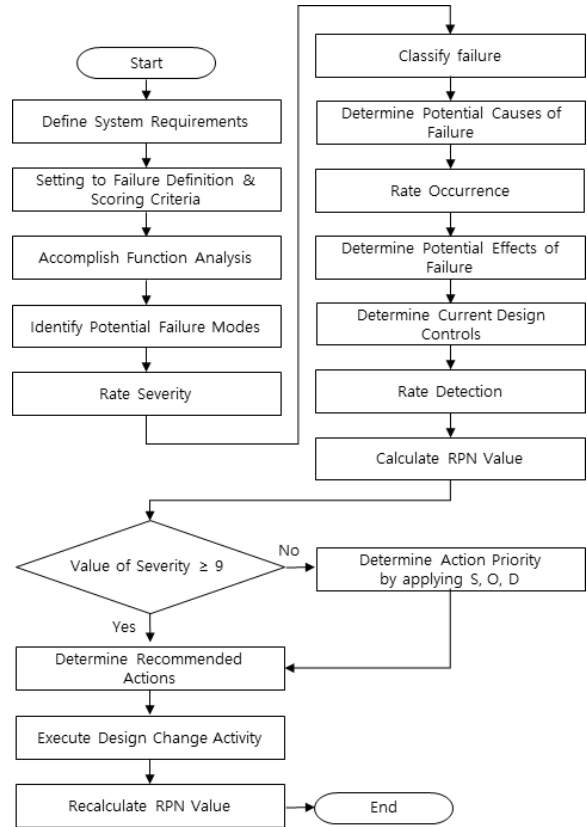
Detection	Likelihood of detection	Rank -ing
Absolute Uncertainty	It is not detected or can not be detected.	10
Very Remote	The probability of detection is very rare.	9
Remote	The probability of detection is rare.	8
Very Low	The probability of detection is very low.	7
Low	The probability of detection is low.	6
Moderate	The probability of detection is moderate.	5
Moderately High	The probability of detection is moderately high.	4
High	The probability of detection is high.	3
Very High	The probability of detection is very high.	2
Almost Certain	The probability of detection is very clear.	1

3. DFMEA 수행 절차

3.1 DFMEA 수행 절차 제안

통상적으로 DFMEA를 수행 시 RPN 값을 산출하여 적용하고 있다. 하지만, RPN 값만으로는 설계 반영의 범위를 확정할 수는 없다. 다시 말하면, 기존 DFMEA에서 설계반영을 위한 권고조치 사항을 제시할 뿐 실제적인 설계반영이 이루어지고 않고 있는 실정이다. 위 사항들을 반영하여 고장 정의, 고장 분류, 기능분석 이후에 관계 매트릭스 분석 및 활동 우선순위(AP; Action Priority)에 대한 설계반영 활동이 가능한 DFMEA 절차를 그림 1과 같이 제시

하였다. 제시한 절차에 대한 각각의 활동은 단계별로 다음과 같다.



[Figure 1] Proposed Process of DFMEA

1단계 : 시스템 요구사항을 정의한다.

시스템의 요구사항이 기술되어 있는 업무기술서(SOW; Statement of Work)를 활용하여 정의한다.

2단계 : 고장정의 및 판단기준(FDSC; Failure Definition Scoring Criteria)을 설정한다.

고장정의 및 판단기준은 시험 평가 계획을 위한 문서[13]로 시험평가의 항목으로 구성되도록 작성되어지도록 한다. 고장정의는 사용자가 시스템의 성능 저하 및 허용할 수 없는 성능으로 간주하는 것을 의미한다. 구성요소 또는 하위 시스템 오작동으로 입증될 때 누가 또는 무엇이 오작동을 야기했는지에 관계없이 고장으로 간주된다. 고장 사건 분류는 필

수 기능 고장 및 비필수 기능 고장으로 분류한다.[14]

3단계 : 기능분석을 수행한다.

요구사항 분석 결과에 따른 기능들을 식별하여 상위 기능 대비 하위 기능을 전개한다.

4단계 : 잠재 고장 모드를 식별한다.

관계 매트릭스 기법을 활용하여 고장정의 및 판단기준에 따라 기능분석에서 구분된 기능에 매핑하여 잠재 고장모드를 식별한다.

5단계 : 잠재 고장 영향을 결정한다.

잠재 고장영향은 고장원인에 따른 분석대상품목의 운용, 기능에 대한 고장 영향의 결과를 식별한다.

6단계 : 심각도를 평가한다.

심각도 평가는 표 1에 따른 고장모드에 의한 구성요소에 미칠 수 있는 영향의 심각성을 적용한다. 특히, 안전성 설계와 관련된 심각도 부여 점수는 9 이상을 적용한다. 이 때, 심각도 10은 운용자 사망, 심각도 9는 장비 손실, 나머지 심각도는 장비별 임무 중요도에 따른 임무 능력 수행 수준으로 등급을 적용한다.

7단계 : 고장 분류를 수행한다.

고장 분류 시 신뢰성 고장은 R(Reliability), 정비성 고장은 M(Maintainability), 안전성 고장은 S(Safety) 및 기타 고장은 O(Others)로 분류하여 설계반영활동과 연계되도록 한다.

8단계 : 잠재 고장원인을 결정한다.

고장원인은 예방 및 탐지가 명확하게 적용할 수 있도록 하드웨어 기반으로 분석한다. 이를 통해, 고장 정비 및 예방 정비 업무에 매핑한다.

9단계 : 현재 설계 관리 방법을 결정한다.

현재 설계 관리 가능한 방법을 예방(Prevention) 및 탐지(Detection)로 구분한다. 예방인 경우 'P' 및

탐지인 경우 'D'로 기술한다.

10단계 : 발생도를 평가한다.

발생도 평가는 설계수명동안 고장 발생 가능성을 판단하는 것으로 신뢰도 예측 값을 기준으로 평가한다. 예측된 고장률 값을 기준으로 표 2를 활용하여 적용한다.

11단계 : 검출도를 평가한다.

검출도 평가는 표 3에 따라 잠재적인 고장원인 및 고장모드 탐지여부를 판단한다.

12단계 : 위험 우선순위 값을 산출한다.

RPN은 고장모드 도출 이후에 리스크 파악 및 평가를 하는 분석 방법이다. RPN은 심각도 S(Severity), 발생도 O(Occurrence) 및 검출도 D(Detection)를 곱하여 Eq. (1)과 같이 산출한다. RPN 값은 조치 활동이 수행되고 나면, 조치 이후 기존 대비 개선된 정도를 측정할 수 있는 정량적 정보를 제공하는데 활용한다.

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

13단계 : 조치 우선순위를 판단한다.

AP는 심각도, 발생도 및 검출도의 가능한 모든 조합에 대한 논리 세부 정보를 활용하여 적용한다. AP는 우선순위 높음(H), 우선순위 보통(M) 및 우선순위 낮음(L)으로 구분된다. H는 우선순위가 최우선 순위로써 적절한 예방 및 검출 통제를 통해 개선해야 하며, M은 적절한 조치를 식별하거나 재량에 따라 통제 수준을 결정하며, L은 개선하기 위한 조치를 식별할 수 있다. RPN 값을 활용한 개선의 우선순위를 정량적으로 선정하기에는 모호하다. 따라서, 안전성 설계를 위해서는 심각도가 9 이상인 경우에는 권고조치 활동을 수행한다. 이 후, 심각도가 8 이하인 경우에는 발생도 및 검출도를 고려한 AP를 적용하며, AP가 'H'인 품목에 대하여 권고조치 활동을 수행한다.

14단계 : 권고 조치 사항을 결정한다.

권고 조치 방안은 고장 분류에 따라 설계반영 활동을 수행한다. 그 결과를 활용하여 고장탐지 및 고장배제 활동과 연계하여 운용유지단계에서 활용할 수 있는 정보를 제공한다.

15단계 : 설계 변경 활동을 수행한다.

조치 우선순위에서 결정된 품목을 권고 조치 사항에 따라 설계 변경 활동을 수행한다.

16단계 : 위험 우선순위 값을 재산출한다.

초기 위험 우선순위 값 대비 조치 우선순위에 따른 설계 변경 활동 이후의 위험 우선순위 값을 재산출한다.

4. DFMEA 사례 분석

4.1 시스템 요구사항 정의

본 논문에서는 DFMEA 사례 분석 대상을 000 유도탄 프로젝트로 선정하였다. 시스템 요구사항 정의에 있어서 000 유도탄의 업무기술서의 요구사항을 정리하여 분석하였다. 단, 표 4의 000 유도탄 업무기술서는 보안 규정상 요구사항 전체를 기술하지는 않았다.

<Table 4> Requirements of 000 Missile

No.	Requirements
1	Seeker target capture distance shall be at least 〇〇 km when engaged in 〇 dB status.
2	Guided control algorithm calculation shall receive target and flight information, calculate a guide command and transmit it to the driving device.
⋮	⋮
10	Missile shall be protected from salt or moisture that may be exposed.
11	When an emergency shutdown order is received, the warhead shall detonate.
⋮	⋮

4.2 고장정의 및 판단기준 설정

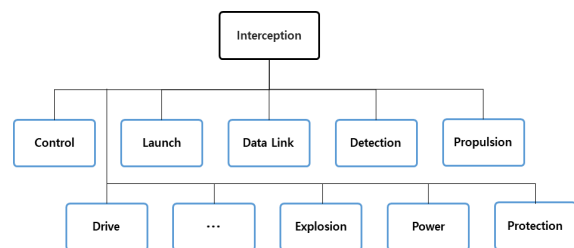
시스템의 고장정의를 수립함에 있어서 필수 기능 고장에 따라 명확한 시험 이벤트로 분류하는 것이 중요하다. 시스템이 요구기능을 수행하지 못하게 되거나 요구 성능을 만족하지 못하게 되는 사건을 식별하였다. 이후, 권고조치 사항 결정을 위한 관리 방안을 시험 이벤트와 연계하여 표 5와 같이 수립하였다.

<Table 5> Management Plan to Failure Category

Failure Category	Management Plan
Safety	<ul style="list-style-type: none"> - Design for Safety - Check with Support Equipment - Operating Procedure - Training Procedure
Reliability	<ul style="list-style-type: none"> - Design for Reliability - Design for Quality - Build In Test - Check with Test Equipment
Maintainability	<ul style="list-style-type: none"> - Design for Maintainability - Visual Check - Preventive Maintenance - Corrective Maintenance
Other events	<ul style="list-style-type: none"> - Design for Human factors - Design for Economic Feasibility - Others

4.3 기능분석 수행

000 유도탄에 대한 기능분석을 수행한 결과는 그림 2와 같다. 000 유도탄의 상위 기능은 요격으로 그 하위에는 제어, 발사, 데이터링크, 탐지, 추적, 구동, 폭발, 전원 및 보호 등으로 분석하였다.



[Figure 2] Function Analysis of 000 Missile

4.4 잠재 고장모드 식별

표 7의 잠재 고장모드는 기능분석을 통해 전개된다. 잠재적 고장모드는 분석대상품목에 대하여 하위 구성품이 잠재적으로 품목/기능 열에 기술된 의도된 기능을 충족하지 못할 수 있다는 방식으로 기술하였다. 이 때, 관계 매트릭스 기법을 활용하여 고장정의 및 판단기준에 따라 기능분석에서 구분된 기능에 매핑하여 잠재 고장모드를 식별하였다. 고장 정의는 필수 기능 고장(EFF; Essential Function Failure) 및 비필수 기능 고장(NEFF; Non-Essential Function Failure)으로 구분된다. 관계 매트릭스 분석 시 행은 기능(예; Control, Launch, Data Link 등)을 나열하였고, 열은 하드웨어 목록(예; Seeker, Guided control device 등)을 기술하였다. 최종적으로 매트릭스를 활용한 OOO 유도탄의 필수 기능 수행 여부를 분석하여 고장 정의를 더 강화시켰다. 고장모드는 기능분석에서 도출된 기능에 기반하여 표 6과 같이 필수 기능 고장 'E'를 부여하였다.

<Table 6> Relationship Matrix for OOO Missile

Relationship Matrix										
ITEM	Control	Launch	Data Link	Detection	Propulsion	Drive	...	Explosion	Power	Protection
Seeker				E						
Guided control device	E									
Driving device						E				
Command receiver			E							
Booster					E					
Detonation device								E		
Power supply									E	
Antenna			E							
Thermal battery									E	
Missile restraint device		E								
Launch tube										E
										⋮

4.5 잠재 고장영향 결정

표 7의 잠재적 고장영향은 고장 모드의 결과로 정의된다. 분석대상품목의 하위 구성품에 대한 잠재 고장모드에 따른 미치는 영향을 기술하였다. 고장영향은 신뢰성 뿐만 아니라 안전에 영향을 미칠 수 있는 영향을 포함하였다.

4.6 심각도 평가

표 7의 심각도 평가는 표 1에 따라 고장모드에 의한 구성요소에 미칠 수 있는 영향의 심각성을 적용하였다. 고장모드의 예고가 있는 탐색기인 경우 9점을 부여하였다. 탄 안전과 관련한 폭발장치, 사용자 운용 및 탄 점검은 8점을 부여하였다. 가장 낮게 4점이 부여된 항목은 탄 보호장치 및 훈련에 관한 사항이었다. 안전성 설계와 관련된 심각도 9 이상을 적용하면, 탐색기 및 사용자 운용 오류, 사용자 점검 오류, 사용자 훈련 오류가 해당되었다.

4.7 고장 분류

표 7의 고장 분류는 안전성을 고려한 분류를 수행하였다. 또한, 고장 분류에 따라 상세 설계 방향 설정을 수행하도록 하였다. 탐색기, 사용자 운용, 점검 및 훈련은 안전성 고장으로 'S'를 부여하였고, 추진기관 및 열전지는 정비성 고장으로 'M'을 부여하였고, 나머지 품목들은 신뢰성 고장으로 'R'을 부여하였다.

4.8 잠재 고장원인 결정

표 7의 잠재 고장원인은 고장모드가 발생할 수 있는 사유를 나타낸다. 이것은 고장 메커니즘으로 고장 원인의 결과는 고장모드가 된다. 고장원인은 예방 및 검출 통제를 보다 정확하게 적용할 수 있도록 할 수 있다. 이에 따라, 가능한 범위 내에서 각 고장모드에 대한 모든 잠재적 고장원인을 식별하였다. 단, 고장원인 결정 시 하드웨어 기준에서 가장 우선순위 항목을 기술한다.

<Table 7> DFMEA of OOO Missile

Design FMEA											
Item/Function	Potential Failure Mode	Severity	Failure Category	Potential Cause	Occurrence	Potential Effect	Current Design Controls	Detection	RPN	Action Priority(AP)	Recommended Action
1. Seeker target capture distance & ability to cope with electromagnetic interference	Unable to capture target	9	S	Seeker target device fault	7	Missile function disabled	D	3	189	H	1. Reliability testing 2. BIT check
2. Guided control algorithm calculation	Unable to guided control	7	R	Guided control device fault	5	Missile function disabled	D	5	175	H	1. Redundancy design 2. BIT check
3. Power supply	Unable to power supply	7	R	Power supply fault	3	Missile function disabled	D	3	63	L	BIT check
4. Warhead safekeeping	Unable to keep safety status in case of sustaining of missile safe state	8	R	Detonation device fault	3	Unable to maintain safe state	D	3	72	L	Check Test Equipment
5. Antenna communication distance	Unable to communicate of command transmitter	7	R	Antenna fault	3	Missile function disabled	D	3	63	L	BIT check
6. Missile restraint and release	Unable to keep safety status in case of accidental ignition of missile	3	R	Missile restraint device fault	3	Unable to maintain safe state	D	5	45	M	Check Test Equipment
7. Booster insensitivity characteristics	Unable to insensitive booster	7	M	Booster fault	5	Unable to maintain safe state	P	5	175	H	Preventive Maintenance
8. Angular velocity of the drive	Unable to operate of driving device	7	R	Driving device fault	3	Missile function disabled	D	3	63	L	BIT check
9. Thermal battery operating time	Unable to operate of thermal battery	7	M	Thermal battery fault	4	Missile function disabled	P	5	140	H	Preventive Maintenance
10. Missile protection	Unable to protect of missile	4	M	Launch tube fault	2	Missile function disabled	D	5	40	L	Visual check
11. Emergency detonation	Unable to operate command receiver when an emergency shutdown order is received	7	R	Command receiver fault	3	Unable to maintain emergency status	D	3	63	L	BIT check
12. Users operations	Unable to control of missile launch	9	S	User operation error	2	Missile function disabled	D	3	54	L	BIT check
13. Check of missile	Launch signal transmitted to missile when checking missile	9	S	User check error	3	Unable to maintain safe state	D	3	81	L	Reflecting the design of missile simulator
14. Training of missile	Launch signal transmitted to missile when training missile	9	S	User training error	2	Unable to maintain safe state	D	3	54	L	Reflecting the design of missile simulator
⋮											

4.9 현재 설계 관리 방법 결정

표 7의 현재 설계 관리 방법은 고장 탐지를 위한 BIT 점검, 시험장비로 점검, 육안점검 및 예방 정비를 수행을 위한 예방 점검 품목으로 선정하였다. 주요 성능을 구현하는 품목에 대하여 BIT 설계를 수행하였고, BIT가 불가능한 품목은 예방 정비를 통해 해소할 수 있도록 하였다.

4.10 발생도 평가

표 7의 발생도 평가는 설계수명동안 고장 발생 가능성을 판단하였다. 신뢰도 예측 값을 기준으로 해당 등급에 따라 1~10 점수를 부여하였다. 예측된 고장률 값을 기준으로 표 2를 활용하여 탐색기 7점, 유도조종장치 5점, 추진기관 3점 순으로 부여하였다.

4.11 검출도 평가

표 7의 검출도 평가는 표 3에 따라 잠재적인 고장원인 및 고장모드 탐지여부를 판단하였다. 점검을 통해 검출 가능성이 높은 품목은 3점을 부여하였다.

4.12 위험 우선순위(RPN) 값 산출

RPN 값은 심각도, 발생도 및 검출도를 곱하여 표 7과 같이 산출하였다. RPN 값이 가장 큰 품목은 탐색기였으며, 가장 낮은 품목은 탄 구속장치이었다.

4.13 활동 우선순위(AP) 판단

AP는 조치에 대한 우선순위가 아니라 위험을 감소시키기 위한 조치의 필요성에 대한 우선순위이다. 표 8을 활용하여 표 7의 AP를 판단하면, AP가 'H'인 품목은 1, 2, 7, 9 항목, 'M'은 6 항목, 'L'은 3, 4, 5, 8, 10~14 항목으로 판단되었다. Severity 9 이상인 경우 및 Severity 8 이하이면서 AP가 'H'에 해당되는 경우에 대해서 설계반영이 진행되도록 표 9와 같이 설정하였다.

<Table 8> Action Priority for DFMEA[15]

Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	Action Priority (AP)
9~10	6~10	1~10	H
9~10	4~5	7~10	H
9~10	4~5	5~6	H
9~10	4~5	1~4	M
9~10	1~3	7~10	H
9~10	1~3	5~6	M
9~10	1~3	1~4	L
5~8	8~10	2~10	H
5~8	6~7	7~10	H
5~8	6~7	5~6	H
5~8	6~7	1~4	M
5~8	4~5	7~10	H
5~8	4~5	5~6	H
5~8	4~5	1~4	M
5~8	1~3	7~10	M
5~8	1~3	5~6	M
5~8	1~3	1~4	L
2~4	8~10	1~10	H
2~4	6~7	7~10	H
2~4	6~7	5~6	H
2~4	6~7	1~4	M
2~4	4~5	7~10	H
2~4	4~5	5~6	M
2~4	4~5	1~4	L
2~4	1~3	7~10	M
2~4	1~3	5~6	L
2~4	1~3	1~4	L
1	1~10	1~10	L

<Table 9> Determination of Action by Case

Case	Determination of Action
Severity \geq 9	If Severity is 9 or higher, Action is taken.
Severity \leq 8 and AP = H	If Severity is 8 or lower and Action Priority is High, Action is taken.

4.14 권고조치 사항 결정

권고조치 사항으로 설계변경, BIT 점검, 시험장비로 점검, 육안점검, 예방정비 및 신뢰성시험 수행 등으로 결정하였다. AP 방안을 적용하여 표 7의 권고조치 사항을 적용하였다. 이를 통해 위험완화 조치를 수행할 수 있는 판단근거로 명확하게 제시할 수 있다.

우선, 안전성 설계를 위한 심각도가 9 이상인 경우로 1, 12, 13, 14번 항목에 대하여 권고조치 활동을 수행하도록 결정하였다.

1번 항목은 안전성 관련 조치 우선 대상으로 신뢰성 시험을 수행하여 요구사항 만족여부를 추가로 확인할 수 있도록 조치하였으며, BIT 점검이 필요한 품목으로 결정하였다. 12번 항목은 사용자 운용의 오류로 인한 심각도 9인 고장 분류가 'S'로 설정하여 BIT 점검이 필요한 것으로 판단하였다. 13, 14번 항목은 사용자 점검 및 훈련의 오류로 인한 심각도 9인 고장 분류가 'S'로 설정하여 유도탄 시뮬레이터를 적용한 설계가 필요한 것으로 판단하였다. 이후, 심각도가 8 이하인 경우에는 발생도 및 검출도를 고려하여 AP가 'H'에 해당되는 품목에 대하여 권고조치 활동을 수행하였다. 2번 품목은 Severity 7, Occurrence 5, Detection 5인 조치 우선 대상으로 다중화 설계를 통한 신뢰성을 향상시킬 수 있도록 조치하였다. 7번 품목은 Severity 7, Occurrence 5, Detection 5인 조치 우선 대상으로 예방정비 항목(10년, 주기교환품목)으로 설정하여 운용성을 향상시킬 수 있도록 하였다. 9번 품목은 Severity 7, Occurrence 4, Detection 5인 조치 우선 대상으로 예방정비 항목(5년, 주기교환품목)으로 설정하여 운용성을 향상시킬 수 있도록 하였다.

4.14 기대효과

기존 DFMEA 양식에서는 RPN 값만 제시되어 있어서 설계반영에 대한 정량적으로 반영하기 어렵다. 본 논문에서는 이를 보완하기 위해 AP를 활용하였고, AP 결정에 따른 설계반영활동을 정량화 할 수 있다. RPN 지수를 활용하여 초기 분석 대비 수정조치 결과 이후의 개선 정도를 산출한 결과는 표 10과 같다. 우선, 위험을 완화하기 위한 조치를 결정하고, 해당 조치의 효과를 평가하였다. 위험분석 결과를 검토하고, 고장원인 또는 고장모드를 감지하기 위해서 고장 원인 발생도를 낮추거나 검출도를 높이기 위한 조치를 수행하였다. 그 결과, 조치 우선 대상 품목인 1, 2 항목은 BIT 점검 뿐만 아니라 신

뢰성 시험 및 다중화 설계를 수행하여 발생도를 낮추었다. 7, 9 항목은 예방정비 항목으로 정비주기를 결정하여 검출도를 높였다. 결과적으로 AP가 High에서 Medium으로 변경되도록 조치하였다. RPN 지수는 초기 위험우선 순위 대비 29.444% 개선됨을 확인할 수 있다.

RPN Index

$$= \left[1 - \frac{RPN \text{ Value after recommended action}}{RPN \text{ Value at initial point}} \right] \times 100$$

$$= \left[1 - \frac{901}{1,277} \right] \times 100 = 29.444$$

<Table 10> RPN Scoring of 000 Missile

RPN Scoring										
ITEM No.	Initial Results					Results after Action				
	S	O	D	RPN	AP	S	O	D	RPN	AP
1	9	7	3	189	H	9	5	3	135	M
2	7	5	5	175	H	7	3	5	105	M
3	7	3	3	63	L	7	3	3	63	L
4	8	3	3	72	L	8	3	3	72	L
5	7	3	3	63	L	7	3	3	63	L
6	3	3	5	45	M	3	3	5	45	M
7	7	5	5	175	H	7	5	1	35	M
8	7	3	3	63	L	7	3	3	63	L
9	7	4	5	140	H	7	4	1	28	M
10	4	2	5	40	L	4	2	5	40	L
11	7	3	3	63	L	7	3	3	63	L
12	9	2	3	54	L	9	2	3	54	L
13	9	3	3	81	L	9	3	3	81	L
14	9	2	3	54	L	9	2	3	54	L
⋮										
Sub total				1,277					901	

5. 결론

DFMEA의 목적은 제품의 잠재적 고장에 대한 사전 검토 및 대책을 수립하는 것이다. 따라서, 효과적인 DFMEA를 적용하기 위해서는 고장이나 결함 발생 이전에 수행되어야 한다. 또한, 잠재 고장이나 결함이 예측되고 평가된 후 이를 개선하기 위한 대책이 수립되어 적용될 때까지 지속적인 관여가 필요하다. 생명주기 프로세스 중 설계 프로세스 활동은 무기체계의 운용유지 단계에서 가장 큰 영향을 미친

다. 이러한 이유로 무기체계 개발 시 연구개발기관은 설계 확정을 구현하기 전에 DFMEA 분석 및 적용으로 최적의 설계를 구현하도록 노력해야 한다.

본 논문에서는 기존의 신뢰성, 정비성 위주의 고장 정의만을 고려하였던 부분에서 안전성을 포함하여 개선된 DFMEA 절차를 제시하였다. 이에 따른 개선된 추가 활동으로는 고장정의 판단기준 설정, 기능분석, 고장분류 및 조치 우선순위 판단 업무를 수행하여 설계 반영이 정량적으로 진행될 수 있도록 하였다. 유도탄 사례분석 결과, 탐색기, 사용자 운용, 점검 및 훈련은 안전성 고장으로 추진기관 및 열전지는 정비성 고장으로 이외 품목들은 신뢰성 고장으로 분류하였다. 특히, 안전성 고장으로 분류된 1, 12, 13, 14번 항목에 대하여 권고조치 활동을 수행하여 신뢰성 시험, BIT 설계 및 지원장비 설계를 반영하도록 하였다. 이에 따라, 안전성 항목을 설계에 반영함으로써 운용유지단계에서 사용자 운용 시 안전 사고를 사전에 차단이 가능하다. 신뢰성 고장으로 분류된 2~6, 8, 11번 항목에 대하여 권고조치 활동으로는 다중화 설계, BIT 설계, 시험장비로 점검을 적용하였다. 정비성 고장으로 분류된 7, 9~10번 항목에 대하여 권고조치 활동으로는 예방정비 및 육안점검을 적용하였다. 마지막으로 조치 우선 대상 품목인 1, 2, 7, 9 항목은 발생도를 낮추거나 검출도를 높여 AP가 High에서 Medium으로 변경되는 설계반영을 수행하였다. 따라서, 본 논문에서 제시한 절차는 사전에 안전 설계 여부를 고려한 권고 조치 활동을 수행 가능함에 따라 사용자 운용시 안전성 보장이 가능하다. 또한, 기존 RPN 값으로만 설계반영 여부 결정을 명확히 할 수 없는 상황에서 AP 활동을 추가 수행하여 설계반영활동 품목을 정량화 할 수 있다. 즉, AP에 따른 권고 조치 활동 항목을 정량적으로 도출하여 설계 적용이 가능하다.

본 논문에서 제시한 무기체계의 안전 설계를 위한 DFMEA 적용 방안은 이해관계자들의 설계 반영 및 자원 재할당 시 관련 근거로 활용 가능할 것으로 판단된다. 향후에는 무기체계 별로 사업 특성을 고

려한 DFMEA 권고조치 활동에 대하여 구체화할 필요가 있다.

References

1. SAE J 1739, Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design FMEA, Society of Automotive Engineers, p. 7, 2002.
2. The Influence of Reliability, Maintainability, Quality, Supportability and Interoperability on System Affordability, Reliability Information Analysis Center, pp. 39-40, 2013.
3. ISO/IEC/IEEE 15288, System and Software Engineering - System Life Cycle Processes, ISO/IEC/IEEE, p. 61, 2015.
4. Ahn, D. G., Yoo, J. M., and Jang, J. S., How to Perform FMEA Effectively for Weapon System Development Stage, Journal of Applied Reliability, Vol. 21, No. 1, pp. 45-60, 2021.
5. Kim, J. C., and Jung, H. J., A Study on Application of DFMEA for Quality Improvement of Weapon System, The Korean Operations Research and Management Science Society Conference, pp. 5640-5659, 2016.
6. Park, K. D., Jung, J. W., Cha, J. H., and Jung, J., A Study on Design Reflection in the Early Stage of Weapon System Development using Functional FMEA, Journal of Applied Reliability Conference, pp. 223-231, 2016.
7. Kim, T. H., Jang, J. S., and Lee, E. Y., Practical Criteria for Process FMEA, Journal of Applied Reliability, Vol. 10, No. 2, pp. 123-135, 2010.
8. Lee, C. H., Yang, K. W., and Kim, S. B., Reestablishment of RPN Evaluation Method in FMEA Procedure for K21, Journal of the Korean Society for Quality Management, Vol. 40, No. 3, pp. 306-315, 2012.

9. Lee, C. H., Yang, K. W., Park, D. I., Lee, I. L., Kwon, J. S., Choi, I. H., and Kim, S. B., A Study on the Risk Identification Methods for Initial and Mass Production Stage of Military Products using FMEA, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol. 42, No. 3, pp. 311–323, 2014.
10. Shin, S. E., Lee, J. H., Park, D. K., and Jung, J. Y., Development of a Safety Assessment System on Aging Management in Exiting CANDU Steam Generators, *Journal of the Korean Society for Systems Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 49–56, 2014.
11. Kim, H. M., Yoon, S. J., Hong, D. G., and Suh, S. H., Design for Smart Management System: from Worker and Mobile Equipment Perspectives, *Journal of the Korean Society for Systems Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 41–49, 2015.
12. Weapons System RAM Law & Guide Book, Defense Acquisition Program Administration, pp. 46–48, 2018.
13. DA Pamphlet 73–1, Test and Evaluation in Support of Systems Acquisition, Headquarters Department of the Army, p. 82, 2003.
14. TRADOC Pamphlet 71–9, Force Development Requirements Determination Department of the Army Headquarters, U. S. Army Training and Doctrine Command, pp. 332–335, 1999.
15. AIAG–VDA Failure Mode and Effects Analysis Handbook, 1st Edition, Automotive Industry Action Group & the Verband der Automobilindustrie, p. 64, 2017.