



Received: 2024/12/19
Revised: 2024/12/29
Accepted: 2025/02/11
Published: 2025/03/31

***Corresponding Author:**

Heewook Kim

Missile Systems IPS R&D Lab, LIG Nex1
20, Daewangpangyo-ro 851, Sujeong-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13449, Republic of Korea
Tel: +82-31-326-9199
Fax: +82-31-326-9001
E-mail: heewook.kim2@lignex1.com

안전성 설계 중심의 무기체계 치명기능 및 치명구성품 선정 방안

A Process for SCF and SCI of Weapon System Based on Safety Design

김희욱^{1*}, 임성준¹, 신찬우², 오영일¹, 박은심¹

¹LIG넥스원 미사일시스템 IPS연구소 수석연구원

²LIG넥스원 미사일시스템 IPS연구소 연구원

Heewook Kim^{1*}, Seongjun Im¹, Chanwoo Shin², Youngil Oh¹, Eunshim Park¹

¹Chief research engineer, Missile Systems IPS R&D Lab, LIG Nex1

²Research engineer, Missile Systems IPS R&D Lab, LIG Nex1

Abstract

본 논문에서는 위험사건 및 안전사고를 유발할 수 있는 무기체계의 치명기능 및 치명구성품을 식별하는 프로세스를 제시한다. 제안된 프로세스는 MIL-STD-882E 기반의 위험요인 분석(hazard analysis) 방법을 활용하였으며, 허용 불가능한 리스크 수준에 해당하는 위험요인의 안전대책 유형을 확인하여 치명기능 및 치명구성품을 선정한다. 또한 위험요인의 심각도 및 발생도를 정량화하여 우선순위를 제시한다. 마지막으로 특정 무기체계를 대상으로 해당 프로세스를 적용한 사례연구를 수행하였다.

This study presents a process for identifying critical functions and critical items of a weapon system that can cause hazardous events and accidents. The proposed process utilizes the hazard analysis method based on MIL-STD-882E to select critical functions and critical items by identifying the types of mitigation measures for hazards that correspond to unacceptable risk levels. It also quantifies the severity and probability of hazards and prioritizes them. Finally, a case study was conducted to apply the process to a specific weapon system.

Keywords

안전성(Safety), 위험요인 분석(Hazard Analysis), 치명기능(Safety Critical Function), 치명구성품(Safety Critical Item), 안전대책(Mitigation Measure)

1. 서론

무기체계 연구개발 단계에서 요구된 성능을 유지하고, 전력화 이후 운용유지 단계에서 발생할 수 있는 고장으로 인한 무기체계 불가동시간을 최소화하기 위한 연구 활동은 활발히 진행 중이다. 가장 대표적인 것이 연구개발 초기 단계에서 수행하는 D-FMEA (design-failure modes effects analysis), FMECA (failure modes, effect and criticality analysis) 등이 있으며, 이러한 연구 활동은 부분품, 조립체, 체계에서 발생할 수 있는 예상 가능한 고장을 찾아 원인을 분석하고 고장이 장비 임무수행 동안 성능에 미칠 영향을 파악한다. 더구나 D-FMEA는 성능과 관련된 핵심부품 및 구성품을 선정하기 위한 입력자료로 활용되고 있다. 이러한 연구 활동의 경우 고장으로 인한 장비 임무수행 영향성, 안전상의 위험, 고장 배제를 위한 방법의 식별, 고장을 수리하기 위한 정비행위 등이 포함되지만, 운용 중에 발생할 수 있는 위험사건으로 인하여 사용자에게 영향을 줄 수 있는 부상, 사망 등의 측면을 고려한 분석은 미미한 부분이 있다.

철도산업 분야에서는 EN 50126 규격을 기반으로 RAMS (reliability, availability, maintainability and safety) 개념을 도입하여 기존 RAM 업무를 포함한 안전성의 중요성 및 관리의 필요성을 강조해 왔으며, 원자력 분야에서도 PSA (probabilistic safety assessment) 방법을 활용하여 원자력발전소의 정량적인 안전성 평

가 수단뿐만 아니라 발전소 설계 및 운전과 정비 등에 폭넓게 사용 중이다[1].

현재 무기체계의 경우 시스템이 대형화되고 복잡도가 높아짐에 따라 사고 및 고장 위험이 증가하고 있으며, 일반 사고와 달리 사망사고와 직결되는 사례가 발생하는 점을 고려하여 안전성 설계의 중요성을 강조하기 시작했다. 그 일환으로 방위사업청에서는 “무기체계 체계안전성 도입방안 연구”(2023년)를 수행하여 체계안전성 업무기준 제정을 추진 중이다. 따라서 향후 국방분야에서도 안전한 무기체계 획득 달성을 목적으로 안전 요구사항의 중요성이 강조될 것이며, 성능 중심의 핵심부품 및 구성품을 선정하여 신뢰성 시험을 통해 고장 취약점을 사전에 관리하듯이 안전 중심의 치명기능 및 치명구성품을 선정하여 사고 리스크를 저감할 수 있도록 연구개발 초기부터 설계 관리가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 연구개발 및 운용유지 단계에서 위험사건 및 안전사고를 유발할 수 있는 무기체계의 치명기능(SCF, safety critical function) 및 치명구성품(SCI, safety critical item)을 식별하고 평가하기 위한 프로세스를 제시하고자 한다. 또한 특정 무기체계를 대상으로 해당 프로세스를 적용한 사례연구를 수행하여 선정된 치명기능 및 치명구성품의 유형을 파악하였다.

2. 치명기능 및 치명구성품 선정 프로세스

본 논문에서 제안하는 안전성 설계 중심의 치명기능 및 치명구성품 선정을 위한 프로세스는 MIL-STD-882E(System Safety) 규격을 기반으로 한 위험요인 분석 방법을 활용하였으며, 안전대책 유형을

정형화하였다. 또한 각 위험요인의 리스크를 평가하기 위한 척도인 심각도와 발생도를 정량화하여 치명기능 및 치명구성품의 우선순위를 정할 수 있다.

해당 프로세스는 Fig. 1과 같이 치명기능과 치명구성품의 후보군을 생성하기 위해 대상 무기체계의 GBL(general breakdown list) 설정 및 기능 정의로부터 시작한다. 이후 위험요인 분석을 수행하여 리스크를 평가하고, 이때 각 위험요인과 관련 있는 무기체계의 기능과 구성품을 식별한다. 허용 가능한 리스크 수준의 위험요인은 관리대상에서 제외하고, 허용 불가능한 리스크 수준 위험요인의 안전대책 유형을 확인하여 치명기능 및 치명구성품 선정 여부를 결정한다. 만약 안전대책 유형의 기준을 만족하지 못하는 경우 각 위험요인의 허용 불가능한 리스크 수준을 정량화하여 우선순위를 제시하고 사용자 판단 하에 치명기능 및 치명구성품으로 선정한다.

2.1 GBL 설정

분석대상이 선정되면 해당 무기체계의 GBL 설정을 통해 구성품을 식별한다. GBL을 설정하는 수준은 연구개발 초기 단계를 고려하여, 단순 기구품, 체결류와 같은 무기체계 임무 수행 및 운용에 영향을 미치지 않는 대상은 제외한다. 따라서 주요 장치 및 회로카드조립체와 같은 기능을 수행하는 단위의 구성품으로 구성한다.

2.2 기능 정의

생성된 GBL을 활용하여 무기체계가 수행해야 하는 기능을 정의하고 구성품과의 관계를 분석한다.

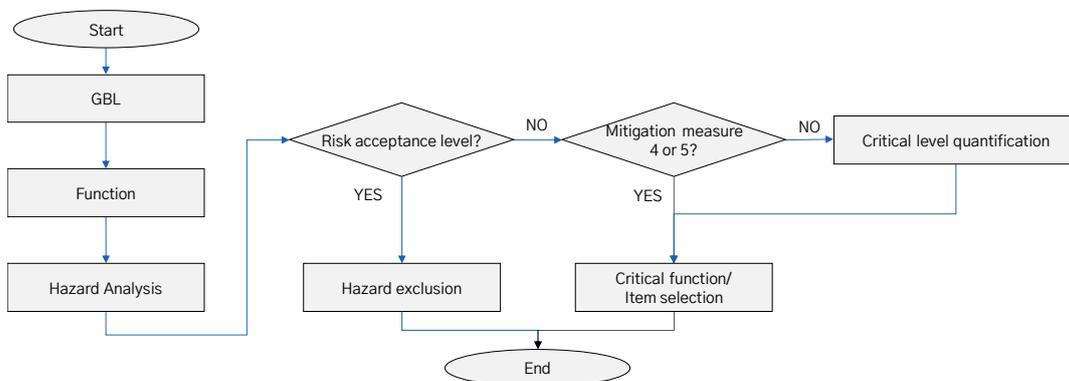


Fig. 1. Process for SCF and SCI

Table 1과 같이 특정 기능 수행에 필요한 구성품을 확인할 수 있도록 관계매트릭스를 작성한다. 세로축은 구성품, 가로축은 기능으로 구분하여 상호 관계가 있는 부분에 “Yes”, 관계가 없는 부분은 “No”를 표기한다.

2.3 위험요인 분석 및 리스크 평가

위험요인 분석은 Table 2와 같은 템플릿을 준용하여 위험요인(hazard)을 도출하고, MIL-STD-882E에서 제시하는 심각도 및 발생도 기준으로 각 위험요인의 리스크를 평가한다[2]. 해당 무기체계에 발생할 수 있는 위험사건(예: 오발, 불발 등)을 설정한 후 위험사건을 야기하는 상황이나 상태를 위험요인으로 도출하고 목록을 작성한다. 식별된 각 위험요인에 대해 관련된 기능, 구성품, 위험요인이 발생하게 되는 원인, 그로 인한 결과를 분석하여 작성하고, 심각도

와 발생도를 측정하여 최종적인 리스크를 평가한다. 마지막으로 각 위험요인의 리스크를 저감할 수 있는 방안을 안전대책으로 도출하여 작성한다.

심각도 및 발생도는 Table 3과 Table 4를 고려하여 각 위험요인에 대한 적절한 수준을 판단하여 결정한다. 여기서 MIL-STD-882E에서 제시하는 기준 이외 심각도 및 발생도에 가중치를 부여하여 리스크 수준을 정량화할 수 있도록 설정하였다. 심각도의 경우 발생도보다 무기체계를 운용하는 인원에게 부상이나 사망사고와 같은 리스크의 수준을 평가함에 있어 더 큰 영향을 끼치는 것으로 판단하여 가중치의 증가율을 발생도와 다르게 적용하였다.

리스크 평가는 결정된 심각도 및 발생도에 따라 각 위험요인의 리스크 수준을 평가하는 과정이다. 리스크 수준은 Table 5와 같이 4단계(High, Serious, Medium, Low)로 구분되며, 허용 가능한 수준의 리스크는 Medium과 Low로 설정하여 지속적인 관리

Table 1. Example of item-function matrix template

Type	Function a	Function b	Function c	Function d
Item A	No	No	Yes	No
Item B	No	Yes	Yes	No
Item C	Yes	No	No	Yes

Table 2. Template of hazard analysis

Hazard	Function	Item	Cause	Consequence	Risk			Mitigation measures	
					S	P	R	Type	Details
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Table 3. Severity levels

Level	Score	Mishap result criteria
Catastrophic	7	Could result in one or more of the following: death, permanent total disability, irreversible significant environmental impact, or monetary loss equal to or exceeding \$10M
Critical	5	Could result in one or more of the following: permanent partial disability, injuries or occupational illness that may result in hospitalization of at least three personnel, reversible significant environmental impact, or monetary loss equal to or exceeding \$1M but less than \$10M
Marginal	3	Could result in one or more of the following: injury or occupational illness resulting in one or more lost work day(s), reversible moderate environmental impact, or monetary loss equal to or exceeding \$100K but less than \$1M
Negligible	1	Could result in one or more of the following: injury or occupational illness not resulting in a lost work day, minimal environmental impact, or monetary loss less than \$100K

대상에서 제외한다. 그리고 리스크 수준의 정량화된 값은 각 위험요인에 해당하는 기능 및 구성품에 할당되고, 하나의 기능이나 구성품이 2개 이상의 위험요인과 연결이 되는 경우 각 위험요인의 리스크 값을 합산하여 치명기능 및 치명구성품의 우선순위를 선정할 때 활용한다.

리스크 평가를 위해 활용되는 매트릭스는 Table 6와 같이 MIL-STD-882E에서 제시한 내용과 동일하게 적용하였으나, 분석자 판단에 의해 리스크 수준의 영역을 변경할 수 있다.

2.4 안전대책 설정 및 기준

위험요인 분석을 통해 식별된 각 위험요인의 리스크를 저감하기 위해 안전대책을 설정한다. 안전대책은 설계 변경, 운용 절차 조정, 보조 수단의 활용 등 가능한 모든 방안을 고려하여 Table 7과 같이 5가지 유형으로 구분한다[3]. 각 안전대책은 우선순위를 가지고 있으며, 안전대책 수립 시 반드시 1순위부터 고려해야 하며, 불가능할 경우 차순위의 적용 가능성을 검토해야 한다. 모든 위험요인은 최소한 5순위의 안

Table 4. Probability levels

Level	Score	Hazard probability
Frequent	5	Likely to occur often in the life of an item
Probable	4	Will occur several times in the life of an item
Occasional	3	Likely to occur sometime in the life of an item
Remote	2	Unlikely, but possible to occur in the life of an item
Improbable	1	So unlikely, it can be assumed occurrence may not be experienced in the life of an item

Table 5. Risk levels

Level	Score	Description
High	35 - 20	The level that must be de-risked
Serious	15 - 12	The level that controls are needed to reduce the risk
Medium	10 - 4	The level that needs ongoing effort to reduce the risk
Low	3 - 1	No effort is required to reduce the risk

Table 6. Risk assessment matrix

Probability	Severity			
	Catastrophic (7)	Critical (5)	Marginal (3)	Negligible (1)
Frequent (5)	High (35)	High (25)	Serious (15)	Medium (5)
Probable (4)	High (28)	High (20)	Serious (12)	Medium (4)
Occasional (3)	High (21)	Serious (15)	Medium (9)	Low (3)
Remote (2)	Serious (14)	Medium (10)	Medium (6)	Low (2)
Improbable (1)	Medium (7)	Medium (5)	Medium (3)	Low (1)

전대책을 확보해야 하며, 1가지 이상의 안전대책 유형을 설정할 수 있다.

2.5 치명 수준 정량화 및 치명기능/구성품 선정

안전대책 설정을 마지막으로 Table 2의 위험요인 분석 템플릿이 완료되면 치명기능 및 치명구성품을 선정할 수 있다. 우선 허용 가능한 리스크 수준에 해당하는 위험요인은 제외시키고, 허용 불가능한 리스크 수준인 위험요인의 안전대책을 확인한다. 안전대책 유형이 1/2/3순위인 경우 설계를 변경, 수정하거나 안전장치 등을 추가하여 설계적으로 리스크 수준을 통제할 수 있는 영역으로 간주할 수 있다. 하지만 4/5수준의 경우 통제할 수 없는 영역으로 리스크

에 노출되는 상태를 최소화하기 위해 사용자 스스로가 주의해야 한다. 따라서 4/5수준의 안전대책을 설정할 수밖에 없는 위험요인에 해당하는 기능이나 구성품은 반드시 치명기능과 치명구성품으로 선정되어야 하며, 연구개발 초기단계부터 운용유지 단계까지 지속적인 관리가 필요하다.

Table 8은 치명기능 및 치명구성품을 선정하는 방법을 나타내는 예시이다. 위험요인 H1과 H3은 리스크 수준이 High와 Serious에 해당하며, 안전대책 유형은 4/5순위이다. 따라서 위험요인 H1 및 H3과 관련 있는 기능 A 및 C가 치명기능으로 선정되고, 구성품 X 및 Z는 치명구성품으로 결정된다.

또한 리스크 수준이 High 또는 Serious이며 안전대책 유형이 1/2/3순위인 위험요인이 존재할 경우에

Table 7. Priority of mitigation measures

Priority	Mitigation measures	Description
1	Elimination	Eliminate hazards by selecting a design or material alternative.
2	Reduction	Consider design changes that reduce the severity and/or the probability of the mishap potential caused by the hazard(s).
3	Engineering device	Apply engineered features or devices to reduce the severity or the probability of the mishap.
4	Warning	Include detection and warning systems to alert personnel to the presence of a hazardous condition or occurrence of a hazardous event.
5	Sign	Signage includes placards, labels, signs, and other visual graphics. Procedures and training should include appropriate warnings and cautions

Table 8. Example of SCF and SCI

Hazard	Function	Item	...	Mitigation measures		SCF	SCI
				Type	Details		
H1	A, C	X	...	4	Alarm device	A, C	X, Z
H2	B, C	X, Y	...	2	Redundancy design		
H3	C	Z	...	5	Warning label		

Table 9. Example of critical level

Hazard	Function	Item	...	Risk			SCF	SCI
				S	P	R		
H4	D, F	X	...	5	3	15	D = 36, E = 35, F = 29	X = 29, Z = 21, Y = 14
H5	E, F	X, Y	...	7	2	14		
H6	D, E	Z	...	7	3	21		

는 Table 6의 매트릭스를 기반으로 각 위험요인의 치명 수준을 정량화하여 추가적인 치명기능 및 치명 구성품을 선정한다.

예를 들어, Table 9과 같이 위험요인 분석을 통해 도출된 3가지 위험요인의 리스크 값을 확인한다. 각 위험요인에 해당하는 기능과 구성품의 리스크 값을 합산하면, 각 기능의 치명 수준은 D(36점), E(35점), F(29점) 순서가 되고, 구성품의 치명 수준은 X(29점), Z(21점), Y(14점) 순서로 도출된다. 여기서 분석자는 치명 수준의 절대적인 기준 점수를 지정하거나, 최고점에 해당하는 대상을 치명기능 및 치명구성품으로 선정할 수 있다.

3. 사례연구

특정 무기체계를 대상으로 사례연구를 통해 안전성 설계 중심의 치명기능 및 치명구성품을 선정하였다. 대상 무기체계로는 원샷시스템인 ○○ 유도탄을 선정하였으며, 탐색기, 유도조종부, 열전지, 탄두조립체, 안전장전장치 등 11종의 구성품을 식별하였다.

또한 발사, 제어, 탐지/기폭, 폭발, 전원, 보호 등의 11개 기능을 정의하여 관계 매트릭스를 통해 구성품과 기능의 관련성을 확인하였다.

위험요인 분석을 위해 설계자 중심의 전문가 집단을 구성하여 설계 자료, D-FMEA, FMECA, 연구 및 설계 반영 활동보고서, 시험평가 결과 등을 검토하여 13개의 위험요인을 도출하였다. 그리고 각 위험요인의 리스크를 평가한 결과는 High 수준 2개, Serious 수준 2개, Medium 수준 6개, Low 수준 3개로 분류되었다. Table 10은 위험요인 분석으로 리스크 수준이 High 및 Serious에 해당하는 위험요인을 정리한 결과로서, 치명기능 및 치명구성품 선정 프로세스에 따라 치명기능은 리스크 수준이 “Serious”이면서 안전대책 유형이 “4수준”에 해당하는 위험요인과 연계된 “전원” 기능으로 선정되었다. 또한 전원 기능의 주요 구성품인 “열전지”가 치명구성품으로 도출되었다.

안전대책 유형이 2/3순위에 해당하는 나머지 3개의 위험요인은 Fig. 2 및 Fig. 3와 같이 기능과 구성품을 기준으로 치명 수준을 정량화하였다.

Table 10. Results of hazard analysis

Hazard	Function	Item	...	Risk			Mitigation measures	
				S	P	R	Type	Details
Poor battery storage	Power	Battery	...	5	3	15 (S)	Rank 4	-
Unintended fuze arming	Detection/ignition, explosion	Safe&Arm device, Warhead	...	7	3	21 (H)	Rank 2	-
Noise introduced when the connector containing the ignition circuit is disconnected	Explosion, propulsion	Warhead, Propulsion system	...	5	4	20 (H)	Rank 3	-
No interruption between the electrical initiator and the subsequent pyrotechnic	Detection/ignition, protection	Safe&Arm device	...	7	2	14 (S)	Rank 3	-

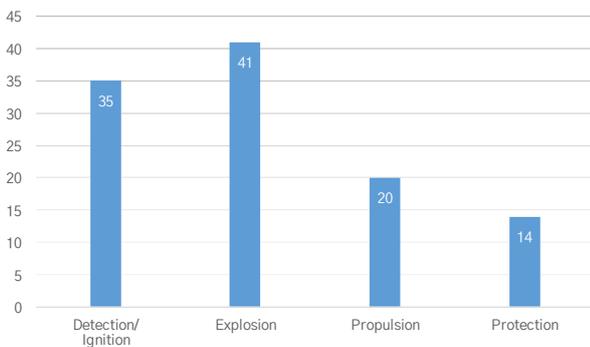


Fig. 2. Critical level of functions

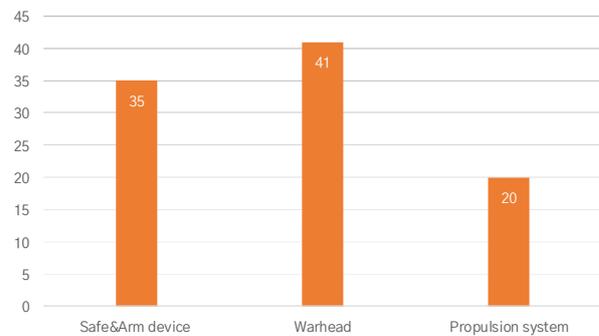


Fig. 3. Critical level of items

○○ 유도탄의 전원 기능 이외 폭발, 탐지/기폭, 추진, 보호 기능 순서로 치명 수준이 산출되었으며, 구성품의 경우 탄두조립체, 안전장전장치, 추진기관 순서로 치명 수준이 도출되었다. 여기서 최상위 치명 수준을 선정 기준으로 한다면, 추가적인 치명기능과 치명구성품은 “폭발” 및 “탄두조립체”로 선정할 수 있었다.

해당 프로세스를 통해 선정된 치명기능과 치명구성품은 인명사고를 유발할 수 있는 화재, 폭발 등의 위험사건과 밀접한 관련이 있는 대상임을 확인할 수 있으며, 탐색기, 유도조종장치 등과 같은 유도탄의 성능과 직결되는 역할을 하는 구성품은 제외되었음을 알 수 있다.

4. 결론

무기체계 연구개발 및 운용유지 단계에서 발생할 수 있는 위험사건과 관련된 치명기능(SCF) 및 치명구성품(SCI)을 선정하는 프로세스를 제안하였다. 해당 프로세스는 MIL-STD-882E 기반으로 위험요인 분석을 수행하고, 리스크 평가 결과에 따라 안전대책 유형을 파악하여 치명기능 및 치명구성품을 선정한다. 또한 치명 수준을 정량화하여 분석자의 의사결정을 지원할 수 있는 방안을 제시하고 사례연구를 통해

제안된 프로세스의 효과를 확인하였다.

총수명주기관리업무훈령에 따라 핵심부품 및 구성품을 선정하는 경우 FMECA, 창정비 대상 여부, 부품단종 등을 고려하여 성능과 밀접한 품목이 관련된 경우가 많다. 유도탄을 예로 들면 탐색기가 대표적인 핵심 구성품이다. 하지만 사례연구를 통해 확인한 바와 같이 안전성을 고려한 경우 열전지, 탄두조립체와 같이 화재, 폭발 등 위험사고의 직접적인 원인이 될 수 있는 품목이 선정되는 것을 알 수 있었다. 따라서 제안된 프로세스를 핵심부품 및 구성품 선정하는 업무와 병행하여 관리한다면 성능과 안전지표를 모두 달성할 수 있는 고품질의 무기체계를 개발할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] Dae-II Kang, Won-Dea Jung, Joon-Eon Yang, “Evaluation of Human Reliability Analysis Results in Probabilistic Safety Assessment for Korea Standard Nuclear Power Plants,” *Journal of Safety*, Vol. 18, No. 2, pp. 98-103, 2003.
- [2] System Safety, MIL-STD-882E, Department of Defense, 2012.
- [3] Hee-Wook Kim, Seong-Jun Im, Jung-Hwan Yoon, Jae-Hoon Lim, Se-Joon Jang, “Development of a Training Platform based on Hazard Analysis,” *Journal of Applied Reliability*, Vol. 24, No. 2, pp. 221-228, 2023.