

FMEA를 활용한 군수품 초도 생산 및 양산 단계의 위험 식별 방안 연구

이창희* · 양경우* · 박두일* · 이일랑* · 권준식* · 최일홍** · 김상부**

* 국방기술품질원

** 창원대학교 산업시스템공학과

A Study on the Risk Identification Methods for Initial and Mass Production Stage of Military Products Using FMEA

Chang Hee Lee*† · Kyung Woo Yang* · Du Il Park* · Il Lang Lee* · Jun Sig Kwon*
Il Hong Choe** · Sang Boo Kim**

* Defence Agency for Technology and Quality

** Department of Industrial and Systems Engineering Changwon National University

ABSTRACT

Purpose: It can deduce improvement plan that recognizes any risk factors in initial production and mass production by using FMEA and through this process, the appropriate criteria for defence items can be established.

Methods: It proposes two methodology - Apply DT/OT data achieved from the beginning mass production stage based on FMECA data of the design stage, to risk management, and risk management plan that reflected line and field failure data in case of is offered.

Results: It proposes the risk management plan through Bayesian method and the risk identification that considered MTTF estimated value in case of initial production process. In case of mass production process, both risk identification by using fault occurrence frequency scores and Bayesian method, In case of the Initial production and mass production, it proposes use both two methods.

Conclusion: A more realistic risk identification method can be applied, and by this method the quality improvement effect is expected.

Key Words: FMEA, Risk Identification, Bayesian Methods

● Received 11 August 2014, revised 3 September 2014, accepted 4 September 2014

† Corresponding Author(cic01@daum.net)

© 2014, The Korean Society for Quality Management

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

후기체계 개발에 있어 설계로부터 양산 단계, A/S 단계에 이르기까지 모든 위험 요소를 식별하고 이를 관리하는데 고장 유형 및 영향 분석 기법 (FMEA : Failure Mode and Effects Analysis) 을 활용하는 것은 매우 효과적이다. 본 논문에서는 FMEA 사용 방법에 대한 설명과 더불어 위험도 매트릭스를 사용하여 고장과 연관된 위험 관리 (Risk Management)를 하는 방안을 제시하였으며, 크게 초기 양산 단계에서 얻어지는 DT(Development Test)/OT(Operation Test) 데이터를 위험 관리에 반영하는 방법과, 공정 불량 데이터와 Field 데이터가 주어지는 경우 이를 반영한 후속 양산 단계에서의 위험 관리 방법에 대하여 다루었다.

초기 양산 단계에서 DT/OT 데이터가 주어지면, ① 베이지안 (Bayesian) 방법을 이용하여 FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)에서 구한 부품의 고장률을 개정하여 위험 발생도 등급을 선정하는 방안 (Method I) 과 ② 초기 설계 당시 추정된 평균고장간격 (MTBF : Mean Time Between Failure) 과 실제 DT /OT 데이터로부터 추정된 평균고장간격의 상대적 비율에 따라 위험 발생도 등급을 조정하는 방안 (Method II) 을 제안하였다. 실제 위험 관리는 위험도 매트릭스의 기준에 따라 진행하게 되며, 위험도 매트릭스를 사용하여 위험도를 선정할 때 위험 발생도 등급은 Method I 과 Method II 에서 구한 값 중 더 높은 등급을 사용한다.

후속 양산 단계에서는 초기 양산 단계 이후 생산 공정에서 발생하는 고장 데이터와 실제 Field에서 운용하는 체계의 고장 데이터를 이용하여 부품/공정 등에 대하여 위험도 등급을 선정하고 이에 대한 개선 대책을 통하여 위험도를 평가하는 절차를 따르게 된다. 후속 양산 단계에서 발생하는 고장에 대한 위험 영향도와 위험 발생도 등급에 따라 위험도 매트릭스로부터 해당 고장의 위험도 등급을 결정하게 되는데, 공정과 Field의 고장 데이터가 주어지는 경우 위험 발생도 등급을 결정하는 두 가지 방안을 다음과 같이 제안하였다. ① 먼저, 부품의 불량률에 대한 사전 정보를 알고 있다는 가정 하에 공정/Field 데이터를 이용하여 베이지안 방법을 통하여 개정된 위험 발생 확률을 구하고 관련 등급을 선정하는 방법과 ② 공정 불량 건수와 Field 불량 건수를 기반으로 회귀분석을 통해 결함 발생 점수 계산식을 구하고, 이를 바탕으로 위험 발생 등급을 결정하는 방안을 제시하였다. 최종 위험 발생등급의 결정은 두 가지 방법 중 높은 등급을 사용하게 된다. 이는 FMEA 기법을 활용하여 고장 위험 식별 방법을 고도화/정교화하고 이를 통해 현장 품질 보증 프로세스를 향상시키는 방안이다.

본 연구의 목적은 군수품 초도 생산 및 양산 단계에서 FMEA 기법을 활용하여 위험 요소를 식별하는 방안을 도출하고, 이를 통해 방산 제품에 적합한 위험 식별 기준을 정립하는 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 FMEA 기법을 활용한 위험식별 방안

설계 FMEA (DFMEA)는 사전제품 품질계획(APQP)의 2단계 활동에서 가장 주요한 부분이다. 아래의 그림은 설계 FMEA 적용 시점에 대해서 설명하고 있다.

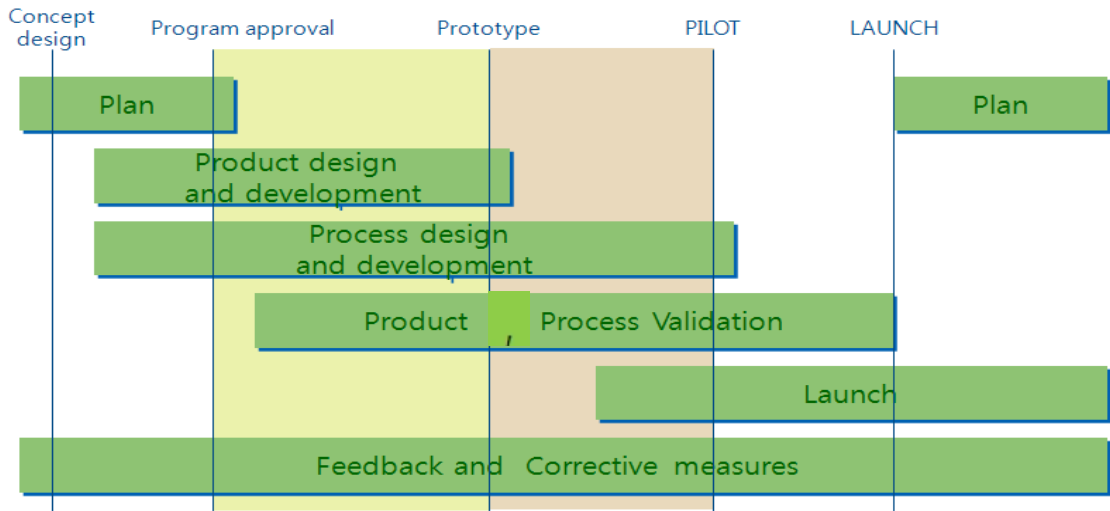


Figure 1. Design FMEA Process

설계 FMEA는 잠재적 고장형태와 이에 관련된 원인 및 발생과정 (메커니즘)이 다루어진다는 것을 보장하는 수단이다. 설계 책임이 있는 엔지니어 또는 팀에 의해 사용되어지는 분석적 기법으로 연관된 모든 시스템, 서브시스템, 구성품, 완제품까지 평가 되어야 한다. 설계 FMEA는 가장 가혹한 상태에서 설계될 때의 팀의 생각을 종합한 것이다. 고장의 위험으로부터 설계요구사항 및 설계 대안의 객관적인 평가, 설계 개선, 개발, 타당성 확인 시험/분석을 위한 정보, 문제 해결과정을 추적하기 위한 서식, 향상된 설계를 개발하는데 미래의 참고자료 등을 설계 시 지원한다. 고객은 최종 사용자, 정부 규제 사항(안전/법규), 차량이나 상위 조립품의 설계 엔지니어/팀, 제조, 조립, 서비스의 제조 엔지니어/팀으로 정의 할 수 있다. 책임 있는 엔지니어로 모든 관련 부분의 직접적이고, 실질적인 대표자가 참여해야 한다.

설계 FMEA는 살아 있는 문서로서 설계 개념의 마무리 시점이나 그 이전에 시작한다. 변경사항 발생 및 추가정보가 있을 때 지속적인 갱신이 필요하며, 제품 도면, 금형, 치공구 준비를 위해 배포되기 전에 기본적으로 완료 되어야 한다.

제조/조립에 대한 요구가 반영되었음을 고려하며, 설계의도를 반영 하고 설계 의도대로 제조/조립될 것이라고 가정한다. 제조나 조립 공정 중에 발생 할 수 있는 잠재적 고장 형태 및 원인 메커니즘은 요구되지 않지만 설계 FMEA에 포함 될 수도 있다. 포함되지 않는 경우 공정 FMEA에 의해 다루어져야 한다.

2.2 FMECA를 활용한 위험식별 방안

군수품의 경우는 설계 당시 FMECA(Failure Mode, Effects and criticality Analysis) 보고서를 작성한다.

FMECA는 개발 초기 단계에서부터 제품 및 공정에서 발생할 수 있는 잠재적 고장이 소비자와 제품에 미치는 영향과 그 원인 및 메커니즘을 상향식(Bottom-up)으로 조사하고, 각 고장유형에 대한 위험도 평가를 통해 위험을 줄이거나 없애기 위한 권고 조치 등을 수행 하여 품질 및 신뢰성을 개선하기 위한 분석 방법이다. 즉 개발 초기부터 작성되는 보고서이기 때문에 좀 더 빨리 잠재된 고장을 식별 할 수 있다.

일반적으로 FMECA의 목적은 다음과 같다. 첫째, 시스템의 다양한 기능적 계층 수준에서 규명된 각 품목 고장유형에 의하여 일어나는 사상 연쇄 및 영향을 평가 한다. 둘째, 시스템의 올바른 기능이나 성능에 대한 각 고장유형의 중요도나 치명도 관련 공정의 신뢰성 및 안전성에 미치는 영향을 결정한다. 셋째, 고장유형의 심각성, 발생가능성, 결과, 기타 적절한 특성에 따라 규명된 고장 유형을 분류한다. 넷째, 자료의 가용도에 따라 좌우되는 고장의 중요도

나 확률의 척도에 대한 추정을 시도한다. FMECA의 가장 큰 특징은 고장과 관련된 부품과 원인, 결과, 그에 대한 평가와 후속조치 등의 정량적/정성적 자료까지 포함된 총체적인 정보를 담고 있는 것이다. 물론 FMECA는 독단적으로 작성될 수 없으며, 신뢰성 블록도(RBD: Reliability Block Diagram), 고장나무분석(FTA: Fault Tree Analysis)과 같은 다른 기법과 동시에 작성되어야 한다. 방위 산업의 경우 높은 신뢰성과 안전성을 요구하며, 유지보수에 들어가는 운용비용이 크기 때문에 FMECA 기법을 적용하여 사전에 위험을 제거 하는 것이 매우 중요하다고 판단된다. 개발 단계에서 획득되는 FMECA 자료를 기반으로 FMEA 기법을 활용하여 군수품 위험 식별 방안을 제시하고자 한다.

3. 연구 설계

3.1 위험식별 연구 모형

본 연구는 초도양산단계 위험도 등급 평가는 초도양산단계위험 영향성 등급과 초도양산단계 위험 발생가능성으로 위험도 등급을 평가하는 방법과 초도양산단계 위험 영향성 등급과 초도양산단계 위험발생가능성 변동량을 통해서 위험도 등급을 평가한다. 단, 두 가지 방법 중 높은 위험도 등급을 나타내는 등급을 위험 식별에 사용 한다. 위험도 등급은 아래의 <Figure 2>의 위험 식별 매트릭스를 통해서 등급을 결정한다.

Like lihood	5	M	M	H	H	H
	4	L	M	M	H	H
	3	L	L	M	M	H
	2	L	L	L	M	M
	1	L	L	L	L	M
			1	2	3	4
		-	IV	III	II	I
		Effects (Consequences)				

Figure 2. Risk Management Matrix

초도양산단계 위험 식별에 사용할 FMECA지표는 위험도 부호, 고장률 (λ)이며, 고장률의 이용하여 위험발생가능성의 등급과 발생가능성 등급 변동량을 확인하고, 위험도 부호를 이용하여 위험영향(결과)지표의 수준을 확인한다. 초도양산단계 위험 식별에 사용할 공정FMEA지표는 심각도, 발생도 지표를 이용해서 발생 가능성과 위험 영향성 평가를 한다.

3.2 초도양산단계 위험 모형

초도양산단계의 위험 영향성 평가는 FMECA의 지표인 위험도 부호를 이용하여 작성한다, 위험 영향(결과)은 위험

발생 시 사용자의 안전 또는 군수품의 성능에 미치는 영향(결과)를 의미한다. 위험영향(결과)는 FMECA의 위험도 부호로 평가하며, 총 5수준으로 분류한다. 수준의 숫자가 커질수록 위험의 영향(결과)가 심각함을 의미 한다. <Table 1>에서 영향(결과) 평가기준과 FMECA 위험도 부호의 크기가 반대로 매칭 되는 것은 FMECA의 경우 부호의 값이 작을수록 심각한 위험으로 표현되기 때문이다.

Table 1. Risk Effect / Consequences

Effects / Consequences		
Level	FMECA Risk Sign	FMECA Risk Sign Explanation
5	I	Catastrophic
4	II	Critical
3	III	Marginal
2	IV	Minor
1	-	-

FMECA는 위험의 영향을 4단계로 분류 하며, 국방기술품질원의 위험 식별 1수준인 위험의 영향이 거의 없음 (Minimal or no)"이라는 수준이 없기 때문에 1수준에 해당되는 FMECA 위험도 부호 칸은 공란으로 표현하였고, FMECA 위험도 부호 IV를 영향(결과) 기준 2수준과 매칭 시킨다. (해석상 Catastrophic과 Severe, Critical과 Significant, Marginal과 Moderate를 동일 수준으로 평가해도 무리가 없을 것으로 판단된다, 또한 국방기술품질원의 국방품질경영업무규정 제2장 중 영향(결과)의 위험평가 항목과 MIL-STD-1629A를 비교하면 정도의 유사함을 확인할 수 있다.

초도양산단계 위험발생가능성 평가는 제품에 대한 평가와 공정에 대한 평가로 나누어진다. 제품에 대한 평가는 개발단계의 FMECA의 지표의 고장률을 바탕으로 해서 개발 단계의 실제 데이터인 DT/OT의 수명 자료를 재평가해서 작성하며, 공정에 대한 평가는 공정FMEA의 발생도 부분을 참고해서 작성한다.

위험발생가능성은 해당 품목이 정해진 기간(수명/거리)내에 고장이 발생할 확률로 정의 되며, FMECA에 기록되어 있는 고장률 정보로 평가하게 된다. DT/OT 데이터가 존재하는 경우 기존의 FMECA 자료와 합하여 개정된 위험발생가능성을 구하고, 이를 바탕으로 위험도 등급을 평가하게 된다.

DT/OT 데이터가 주어진 경우, 위험발생가능성은 두 가지 방법으로 개정 할 수 있으며 Method I은 베이지안 방법을 이용하고 Method II는 설계 MTBF (Mean Time Between Failure) 대비 DT/OT 데이터로부터 구한 MTBF 추정값의 비율을 기반으로 위험발생가능성을 수정한다.

초도양산단계 Method I은 초도양산단계에서 위험발생가능성이 주어진 고장률 (λ)을 기초로 단위 시간당 불신뢰도 (p)를 계산하고, p 값을 기준으로 총 5수준으로 분류하며, 등급이 커질수록 위험발생가능성이 커짐을 의미한다. <Table2>에 제시되어 있는 발생 가능성의 기준은 ISO/TS 16949 의 설계FMEA 발생도 값을 차용하여 변형한 것이며, 무기체계별 특화되어 있는 규격이 있는 경우 해당규격을 사용하는 것을 우선으로 한다.

Table 2. Initial Production Risk Occurrence Rate

Initial Production Risk Occurrence	
Level	Occurrence Probability
5	$50,000 \times 10^{-6} < p$
4	$5,000 \times 10^{-6} < p \leq 50,000 \times 10^{-6}$
3	$500 \times 10^{-6} < p \leq 50,00 \times 10^{-6}$
2	$10 \times 10^{-6} < p \leq 500 \times 10^{-6}$
1	$p \leq 10 \times 10^{-6}$

초도양산단계 Method II은 초도양산단계 위험 발생가능성 등급 변동량은 설계단계의 고장률 데이터를 이용해서 MTBF를 구하고, DT/OT 수명 데이터의 평균을 구한다. 이는 초기 설계 단계에서 추정된 MTBF가 개발/운용 시험 중에 발생한 고장 데이터와 얼마나 일치 하는지를 알아보기 위해서이다.

그 이유는 초기 설계 단계에서 고장률을 추정할 때 과도하게 추정하는 경향을 보이기 때문에 실제로 개발/운용시험 중 발생한 고장 데이터로 발생 가능성 등급을 변동 시키는 것이 목적이다.

Table 3. Initial Production Occurrence Rate Variation

η	Initial Production Occurrence Rate Variation
$30 \leq \eta$	No change
$10 \leq \eta < 30$	level 1
$\eta < 10$	level 2

η 는 초도양산단계 위험발생가능성 등급 변동량이며, η 가 10 미만인 경우에 DT/OT 데이터로부터 구한 MTBF 추정 값이 초기 설계 평균 수명의 10%미만인 경우를 의미하며, 현재 발생 가능성 등급에서 2단계 상향 조정한다. <Table 3>는 초도양산단계 위험발생가능성 변동량을 나타내는 표이며, 만약 η 가 10보다 작은 경우에 발생가능성 등급이 1이라면 2단계 높아져서 발생가능성 등급이 3이 된다. 발생가능성 등급이 5를 넘어가는 경우에는 5를 사용한다. 위와 같이 발생 영향/결과와 발생 가능성, 발생가능성 등급 변동량에서 설정된 기준에 따라 국방기술품질원의 위험 매트릭스에 매칭 시켜 식별된 위험의 수준을 판정한다.

FMECA를 이용한 위험 식별의 경우 현장 실무직용의 용이성을 위해 기존의 국방품질경영업무규정의 위험등급 평가 매트릭스를 차용한다. 또한, 위험 영향(결과) 수준 확인의 용이성을 위해 영향(결과)의 칸에 FMECA 위험도 부호 칸을 추가한다. <Figure 2.>에서 위험등급 평가 매트릭스와 위험지표별 기준을 사용하면 해당 위험의 등급을 확인할 수 있다. 예를 들어 품목 A의 FMECA 위험도 부호가 III이고, 고장률이 $1,000 \times 10^{-6}$ 이면, <Figure 2.>에 따라 위험등급은 M이 된다.

위험등급이 결정되면, 국방품질경영업무규정 제2장의 지침에 따라 품질보증활동을 작성하여 수행해야 한다. 또한, FMECA의 특징인 후속조치 후 감소된 치명도를 확인하는 것처럼 위험 식별 후속조치 후 위험의 감소 정도를 위험지표를 통해 확인할 것을 권장한다.

3.3 후속양산단계 위험 모형

후속양산단계 위험도 등급 평가는 제품/공정에 대해 실시한다. 후속양산단계 위험 영향성 등급과 후속양산단계 발생가능성으로 위험도 등급을 평가하는 방법과 후속양산단계 위험 영향성 등급과 후속양산단계 발생가능 점수로 위험도 등급을 평가한다. 단, 두 가지 방법 중 높은 위험도 등급을 나타내는 등급을 위험 식별에 사용한다. 위험도 등급은 앞 그림의 <Figure2.>의 위험 식별 매트릭스를 동일하게 사용해서 등급을 결정한다. 후속양산단계 위험 영향성 평가는 원자재/제품/공정/수락시험에 대한 평가로 나누어진다. 제품에 대한 평가는 초도양산단계의 설계 FMEA의 지표인 위험도 부호를 이용해서 작성하며, 공정에 대한 평가는 초도 양산단계의 공정 FMEA결과 지표를 이용해서 작성한다. 단, 위험 영향성의 경우 필요시 팀을 조직해서 다시 평가 할 수 있다. 후속양산단계 위험 식별에 사용되는 지표는 위험영향성, 위험 발생가능성, 발생가능 점수이다. 후속양산단계 위험 식별에 사용되는 지표는 초도 양산단계 위험 식별 시트의 위험 영향성과 위험발생가능성을 사용한다. Field 데이터가 주어진 경우, 후속양산단계 위험발생가능성은 두 가지 방법으로 개정 할 수 있으며, Method I은 베이지안 방법을 이용하고 Method II는 위험발생가능성 점수 함수를 기반으로 위험발생가능성을 수정한다. 후속양산단계 Method I은 공정/필드 데이터를 이용해서 초도양산 발생 가능성을 재계산한 뒤, 위험 영향성을 이용하여 위험 영향(결과)지표의 수준을 확인한다.

후속양산단계 위험 식별 때 사용되는 <Table 4>은 후속양산단계 위험 발생가능성으로 ISO/TS 16949 의 설계 FMEA 발생도 값을 차용하여 작성하였다.

Table 4. Mass Production Risk Occurrence

Rating	Mass Production Risk Occurrence (p)
5	$50,000 \times 10^{-6} \leq p$
4	$5,000 \times 10^{-6} < p \leq 50,000 \times 10^{-6}$
3	$500 \times 10^{-6} < p \leq 5,000 \times 10^{-6}$
2	$10 \times 10^{-6} < p \leq 500 \times 10^{-6}$
1	$p \leq 10 \times 10^{-6}$

후속양산단계 Method II는 공정/Field 데이터에서 공정 고장 건수와 Field 고장 건수의 함수로 계산한다. 여기서 발생 가능 점수의 등급은 <Table 5>과 같다.[10]

Table 5. Mass Production Risk Occurrence Score

Rating	Mass Production Risk Occurrence Score (S)
5	$32 \leq S$
4	$17 \leq S < 32$
3	$10 \leq S < 17$
2	$6 \leq S < 10$
1	$S \leq 6$

위험도 등급의 결정은 발생 영향/결과와 발생 가능성, 발생가능점수를 바탕을 등급을 결정하고, 국방기술품질원의 위험 매트릭스에 매칭시켜 식별된 위험의 수준을 판정한다. 단, 계산된 두 가지 등급 중 높은 위험도 등급을 적용한다.

4. 실증분석

위험식별은 초도양산과 후속양산으로 구분하여 식별하며, 각각 절대적인 방법과 상대적인 방법을 혼용하여 최적의 위험식별 방안을 제시하고, 검증한다.

4.1 초도양산단계 위험 식별 (Method I)

초도양산단계 위험 식별 Method I은 위험발생 가능성을 개발단계 FMECA의 고장률과 DT/OT 수명데이터를 이용하여 고장확률을 재계산하는 것이다. 단, 부품의 수명이 지수 분포(λ)를 가정하고 있다. 만약 개발 단계 FMECA자료가 없다면, 해당 부품의 유사한 부품의 고장률을 사용한다.

Table 6. Initial Production Risk Identification Sheet

Order ①	Failure Type ②	Failure Cause ③	FMECA Failure rate ④	Test (DT/OT)⑤		Risk Effect ⑥	Risk Occurrence ⑦	Risk Occurrence Variation ⑧	Risk Level ⑨
				Fault NO	life				
-	-	-	λ	n	t_i	-	λ'	η	-

<Table 6>은 초도양산단계 위험 식별 Sheet 이며, FMECA 고장률을 개발시험(DT/OT)의 수명 데이터를 이용하여서 위험발생가능성을 다시 계산한다. 초도양산단계 위험 식별 Method I의 순서는 다음과 같다.

부품 고장률 λ 와 DT/OT데이터로부터 λ' (위험발생가능성)을 추정 한다. (Bayesian 방법) 부품의 수명이 지수분포를 따른다는 가정 하에 고장률 λ 에 대한 사전 분포로 평균이 $1/\theta$ 인 지수분포가 주어졌을 때, λ 에 대한 사후 추정량은 다음과 같다.

$$\lambda' = \frac{1+n}{\theta + \sum t_i} \tag{1}$$

n : 고장 갯수

θ : 사전 분포의 모수

t_i : 해당부품의 고장시간 $i=1, \dots, n$

여기서, θ 는 평균수명 ($1/\lambda$)이며, n 은 고장 대수, $\sum x_i$ 는 해당 부품의 총 고장 시간이 된다. 위험발생가능성 등급을 나타내는 <Table 2.>로부터 λ' 이 속하는 등급을 계산한다.

4.2 초도 양산 단계 (Method II)

초도양산단계 위험 식별 Method II은 위험발생 가능성을 DT/OT 수명데이터의 평균 수명의 구하여 초기 설계 평균 수명과 비교하여 위험발생가능성 변동량 등급을 조정하는 방법이다.

단, 초기 설계 평균 수명과 DT/OT 시 얻어진 평균 수명에 대해서 검증이 필요할 때 사용한다. 초도양산단계 위험

식별 Method II의 순서는 다음과 같다. DT/OT 의 수명 데이터로부터 MTBF 추정치 \bar{T} 를 구한다.

<Table 7>은 초도양산단계에서 얻어진 수명 데이터 표이다.

Table 7. Initial Production DT/OT Data

Development		Production		-
Failure Matter	Failure No	Failure Matter	Failure No	Failure Time
-	1	-	-	650
-	1	-	-	920
-	1	-	-	1200
-	1	-	-	2020

DT/OT 데이터로부터 MTBF추정치 \bar{T} 를 구한다. <Table 7>의 고장 발생 시점 데이터에 대해서 \bar{T} 를 구해 보면 $\frac{650 + 920 + 1200 + 2020}{4} = 1197.5$ 가 된다. FMECA 고장률 λ 부터 초기 설계 평균 수명 θ ($\frac{1}{\lambda}$)을 구한다.

<Table 8>은 개발 단계에서 실시한 FMECA자료이다.

Table 8. FMECA Data

Item No	Item Name	Risk Identification	Risk Identification Source	FMECA Data	
				Failure rate	Failure Level
A60072 741	Rear Support	-	From FMECA	3.5385×10^{-6}	L

<Table 8>에서 고장률 데이터를 이용해서 MTBF를 구한다.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{3.5385 \times 10^{-6}} = 282605.26$$

$\eta = \frac{\bar{T}}{\theta} \times 100\%$ 값을 구하여 초도양산단계 위험발생가능성 등급 변동량 표의 해당 범주에 따라 발생가능성 등급을 변경한다.

η 를 구하면 $\frac{1197.5}{282605.26} \times 100 = 0.4237\%$ 가 된다.

η 값이 10% 미만이므로 초도양산단계 위험발생가능성 변동표<Table 3>를 기준으로 해당 부품의 위험발생가능성을 DT/OT 데이터를 고려하여 이전보다 2단계 높여야 한다.

4.3 후속 양산 단계 (Method I)

후속양산단계 위험 식별 Method I은 초도양산 발생 가능성을 후속양산단계 위험 발생가능성으로 재계산한다. <Table 9>는 후속양산단계 위험 식별표이다.

Table 9. Mass Production Risk Identification Sheet

Order ①	Failure Type ②	Failure Cause ③	Initial Occurrence ④	In-plant/Field⑤		Risk Effect ⑥	Risk Occurrence ⑦	Risk Occurrence Score ⑧	Risk Level ⑨
				In-plant Fault NO	Field Fault NO				
-	-	-	p	xx	xx	-	p'	η	-

초도양산 발생 가능성 p 와 공정/Field 데이터로부터 p' (위험 발생가능성)을 추정한다. (Bayesian 방법)[11]

$$p' = \frac{\alpha + \sum x_i}{\alpha + \beta + n} \tag{2}$$

n = 샘플 크기

α, β = 베타 (Beta)사전 분포의 모수

x_i = 해당부품의 고장 여부를 나타내는 Indicator Variable

후속양산단계 위험발생가능성 등급을 나타내는 <Table 4>표로부터 p' 이 속하는 등급을 계산한다.

4.4 후속 양산 단계 (Method II)

후속양산단계 위험 식별 Method II는 공정/Field 데이터의 공정 고장 건수, Field 고장 건수를 사용해서 후속 양산 단계 발생 가능 점수를 계산한다.

Table 10. Mass Production Risk Identification Sheet

Order ①	Failure Type ②	Failure Cause ③	Initial Occurrence ④	In-plant/Field ⑤		Risk Effect ⑥	Risk Occurrence ⑦	Risk Occurrence Score ⑧	Risk Level ⑨
				In-plant Fault NO	Field Fault NO				
-	-	-	-	3	4	-	-	-	-

<Table 10>는 후속양산단계 위험 식별하기 위해서 사용되는 정보를 표시 한 것이다. 공정의 경우 초도 양산단계에서 실시한 공정FMEA자료의 위험 우선수 (RPN)값을 기준으로 하여 100이상인 경우에만 실시한다. 공장 고장 건수란 라인 불량 건수와 시정조치 건수의 합이다. 라인 불량이란 업체에서 발견한 공정 불량 건수를 말하며, 시정 조치는 국방기술품질원에서 발견한 공정 불량 건 수를 말한다.

Field 고장 건수란 Field 불량 건수와 사용자 불만 건수의 합이다. Field 불량은 해당 체계 제품이 Field에서 고장 난 건수이며, 사용자 불만은 체계 제품이 Field에서 운용될 때 발생하는 문제점에 대한 사용자 불만 제기 건수를 말한다. 후속양산단계 위험 식별 Method II의 순서는 다음과 같다.

$$\text{후속양산단계 발생가능점수} = C + \alpha (\text{공정 고장 건수}) + \beta (\text{Field 고장 건수})$$

단, α, β 는 회귀 분석 결과 도출된 비례 상수이며, C 값은 위험 점수로부터 구한 위험 발생 등급과 발생 가능 점수에 따른 위험 발생 등급의 차이가 가장 작아지도록 구하면 된다.

Regression Analysis: Risk Score versus Line ea n Co, Field ea n C						
The regression equation is						
Risk Score = 5.29 + 0.217 Line ea n Correction ea + 0.111 Field ea n Claim ea						
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF	
Constant	5.2872	0.3082	17.15	0.000		
Line ea n Correction ea	0.21727	0.07889	2.75	0.012	1.537	
Field ea n Claim ea	0.11139	0.04591	2.43	0.024	1.537	
S = 1.09008 R-Sq = 61.0% R-Sq(adj) = 57.3%						
PRESS = 31.7115 R-Sq(pred) = 50.45%						

Figure 3. Regression Analysis Table

위의 분석결과로부터 구한 회귀 모형은 다음과 같으며 Risk Score = 5.29 + 0.217 공정 고장 건수 + 0.111 Field 고장 건수이다. 여기서 Line ea n Correction ea, Field ea n Claim ea 는 각각 K 제품 한 대당 해당 불량 건수를 의미한다. 이 회귀모형에 포함된 두 개의 설명 변수에 따라 p-value가 0.05보다 작기 때문에 회귀 모형이 통계적으로 유의하다고 할 수 있다. 그리고 회귀모형이 설명하는 데이터의 변동은 R^2 기준으로 61%이다. α, β 의 의미는 공정 고장 건수와 Field 고장 건수의 상수는 공정의 고장 건수가 1단위 증가 또는 감소하였을 때 Risk Score에 미치는 양을 말하며, K 제품의 경우 $\alpha = 2, \beta = 1$ 로 지정하였다.

4.5 적용사례 연구

<Table 11>은 K 부품에 관한 FMECA 자료 및 개발/운영시험 (DT/OT)중 결함 데이터를 수집한 Sheet 이다.

Table 11. FMECA + DT/OT DATA

Development		Production			FMCEA Failure Rate
Failure Matter	Failure No	Failure Matter	Failure No	Failure Time	
-	1	-	-	650	3.5385×10^{-6}
-	1	-	-	920	
-	1	-	-	1200	
-	1	-	-	2020	

초도양산단계 위험 식별 시 사용하는 데이터는 FMECA의 품명, 위험 식별 내용, 발생 가능성, 영향(결과), 고장률, 위험도 등급이다. DT/OT에서 고장 데이터를 사용한다. <Table 12>는 초도양산단계 위험 식별 Sheet 이다.

Table 12. Initial Production Risk Identification Sheet

Order ①	Failure Type ②	Failure Cause ③	Initial Occurrence ④	In-plant/Field ⑤		Risk Effect ⑥	Risk Occurrence ⑦	Risk Occurrence Score ⑧	Risk Level ⑨
				In-plant Fault NO	Field Fault NO				
-	-	-	3.5385×10^{-6}	4	650 820 1200 2020	4	λ'	η	

품명, 고장유형, 고장원인, FMECA 고장률, 위험 영향성의 데이터는 개발 단계의 FMECA 자료를 참고해서 입력한다. 개발시험(DT/OT)는 고장 건수 및 고장 수명을 입력한다.

위험발생 가능성은

$$\theta = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{3.5385 \times 10^{-6}} = 282605.64$$

$$\sum t_i = 650 + 920 + 1200 + 2020 = 4790$$

$$n = 4$$

$$\lambda' = \frac{n+1}{\theta + \sum t_i} = \frac{4+1}{282605.624 + 4790} = 17.3976 \times 10^{-6}$$

따라서, 초도양산단계 위험발생가능성 등급은 2등급이 된다.

초도양산단계 위험발생가능성 변동량 개발 단계 FMECA에서 초도양산단계 위험발생가능성 등급은 1이다.

$$\bar{T} = (650 + 920 + 1200 + 2020)/4 = 1197.5$$

$$\theta = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{3.5385 \times 10^{-6}} = 282605.64$$

$$\eta = \frac{\bar{T}}{\theta} \times 100\% = \frac{1197.5}{282605.26} \times 100\% = 0.4237\%$$

따라서, η 의 값이 10%보다 적기 때문에 초도양산단계 위험발생가능성 등급을 2단계 상승시켜 초도양산단계 발생 가능성은 3이 된다.

5. 결 론

본 연구는 정부 품질보증 고도화를 위한 개선 방안으로 FMEA 기법을 사용한 고장 위험 식별 방법을 초기 양산 단계와 후속 양산 단계로 구분하여 제안하였다. 본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

초기 양산 단계에서 DT/OT 데이터가 주어지면, ① 베이지안 방법을 이용하여 FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)에서 구한 부품의 고장률을 개정하여 위험 발생도 등급을 선정하는 방안 (Method I) 과 ② 초기 설계 당시 추정된 평균고장간격 (MTBF : Mean Time Between Failure) 과 실제 DT/OT 데이터로부터

추정된 평균고장간격의 상대적 비율에 따라 위험 발생도 등급을 조정하는 방안 (Method II) 을 제안하였다.

후속양산의 경우 ① 먼저, 부품의 불량률에 대한 사전 정보를 알고 있다는 가정 하에 공정/Field 데이터를 이용하여 베이지안 방법을 통하여 개정된 위험 발생 확률을 구하고 관련 등급을 선정하는 방법과 ② 공정 불량 건수와 Field 불량 건수를 기반으로 회귀분석을 통해 결함 발생 점수 계산식을 구하고, 이를 바탕으로 위험 발생 등급을 결정하는 방안을 제시하였다. 최종 위험 발생등급의 결정은 두 가지 방법 중 높은 등급을 사용하게 된다.

FMEA 기법을 활용한 품질보증효율화 방안은 베이지안 방법을 이용하여 이론적 근거를 바탕으로 실효성 있는 위험 식별방안을 제시하였으며, K21 장갑차를 실례로 사용하여 제안방법의 타당성을 검증받았다. 이러한 연구결과를 적용함에 있어 체계 업체의 현실을 고려할 때, FMEA 기법의 활용은 쉽지 않은 선택이지만 이를 경시하게 되면 우리나라의 방위 산업의 품질보증은 앞으로 기대하기 어려운 지경에 이를 것이라 사료된다. 앞으로 본 연구에서 다루었던 FMEA 이외에도 민수 부문에서 많이 활용하는 다양한 과학적이고 체계적인 도구와 방법론을 더욱 활발히 도입할 필요가 있으며 이는 전자산업과 같이 이미 높은 수준의 관리 체계를 활용하고 있는 분야를 참고할 필요가 있다고 생각된다.

REFERENCES

- Carl, Carlson. 2012. *Effective FMEAs: Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes using Failure Mode and Effects Analysis*. Wiley.
- DAPA. 2009. *Integrated Logistics Support Development Practical Guidelines*.
- DoD, MIL-STD-1629A. 1980. US.
- DTAQ. 2012. *Defense Quality Management Regulations:7-11*.
- Hoqq, Robert V., McKean, Joseph, and Craig, Allen T. 2012. *Introduction to Mathematical Statistics, 7th Edi.* Pearson.
- ISO. 2009. *ISO/TS 16949*.
- Jang, Joong Soon, and Aan, Dong Geun. 1997. "How to Perform FMEA Effectively." *The Korean Society for Quality Management:156-172*.
- Kim, Yung Yeop. 2010. *Introduction to Defense Quality Management, 86-111*. Hyungseul Publisher.
- Stamatis, D. H. 2003. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*, American Society for Quality.
- MIL-HDBK-338A. 1987. *FMECA Guidelines for writing, 4-24*.
- MIL-STD-1629A. 1988. *FMECA Guidelines for Writing, 11-25*
- MIL-STD-882D. 2000. *Risk Management Guide for DoD Acquisition, 5-30*.
- Montgomery, Douglas C. 2012. *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley.

