

전자장비 신뢰성 향상을 위한 ESS 프로세스 모델링 및 적용에 관한 연구

최종수[†] · 이창우

* 국방기술품질원

A Study on ESS Process Modeling and Application for Improving Reliability of Electronic Equipments

Jongsoo Choi[†] · Chang Woo Lee

* Defense Agency for Technology and Quality(DTaQ)

Purpose: In this study, we propose the ESS process model which, in order to improve reliability of electronic equipment, can be referenced in both development and production phases.

Methods: ESS guidelines such as MIL handbooks or private sector ESS guidelines are used for devising the proposed ESS model. Especially, proposed model is customized by using those references in order to be optimized in the domestic development and production phases.

Results: ESS-related-requirements which is specified in the Technical Data Package(TDP) for the area of guided missile systems are analyzed. Current status of the requirement and screening strength are analyzed for those systems to show what kind of weak points should be improved.

Conclusion: A ESS guideline which is applicable to the domestic weapon acquisition environment is proposed. As such, the necessity and detail guidelines of the proposed model are explained.

Key Words : Environmental Stress Screening(ESS), ESS profile, random vibration, thermal cycling, Technical Data Package(TDP)

1. 서 론

ESS(Environmental Stress Screening, 환경 부하 선별)는 전자장비의 유입결함에 대하여 온도, 진동 등과 같은 환경부하를 인가함으로써 양산 공정초기에 촉진 및 제거하는 공정이다(MIL-HDBK-2164A, 1996). 유입결함이란 장비의 양산 공정 중 품질에 영향을 미치는 4M 요소 즉, 작업자의 미숙(Man), 제조 장비 및 환경의 부적합(Machine), 자재품질(Material), 적절치 않

은 제조방법(Method) 등의 이유로 장비에 유입되어 사용자가 운용하는 과정에 고장을 일으킬 수 있는 고장유형을 의미한다. 유입결함은 공정 중에서는 육안 또는 전기적 시험으로 식별이 불가능한 유형이며 운용환경 상에서 환경부하가 인가됨에 따라 고장으로 촉진될 수 있다. 하지만 유입결함은 장비의 제조환경 중 유입되는 결함 외에 부적절한 설계 및 운용환경 등에 따른 결함은 포함하지 않는다.

제품을 생산하는 경우 완벽한 4M 요소를 제조공정에서 구현하기는 현실적으로 불가능하다. 따라서 모든 장비는 공정품질 수준에 따른 유입결함을 보유하고 있으며, 장비 간 유입결함의 정도는 구체적으로 장비의 복잡도, 작업자의 일شم씨, 부품 품질 등에 따라 다를 수 있다. 다만 유입결함에 따른 운용 중 고장은 아래와 같

[†] Corresponding Author

Defense Agency for Technology and Quality, Daegu Center, 1369-2, Manchon 1-dong, Suseong-gu, Daegu 706-803, Korea
 Tel: 053-757-3015 Fax: 053-754-9294
 E-mail: jongsoo2@gmail.com

이 대표적인 공통 요인에 따라 대부분 발생하며, 이러한 고장 원인을 ESS 프로세스 수행을 통해 사전 제거함으로써 비용-효과적인 방법으로 품질 신뢰성을 향상시키는 것이 ESS 프로세스 수행의 목적이다(MIL-HDBK-344A, 1993).

- 전선의 부적절한 연결(개방, 단락, 와이어링 등)
- 부적절한 납땜(냉납 등)
- 부적절한 접합부(Sealing 결함, 부품 연결결함 등)
- 규격에 미달된 부품의 품질 특성
- 부품 특성 및 파라미터의 Drift 등

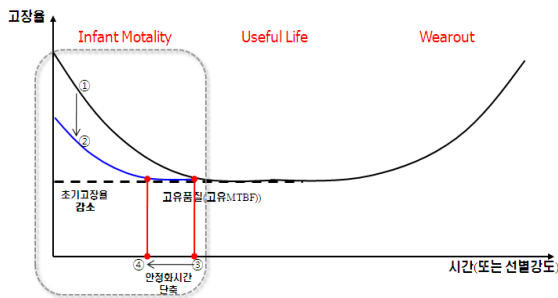


Fig. 1. Bathtub Curve

양산 배치된 장비의 시간에 따른 고장률은 일반적으로 <그림 1>과 같이 Bathtub 곡선으로 표현된다. 그림에서와 같이 일반적인 장비의 고장률 분포는 운용 초기로부터 사용시간에 따라 점차 감소하여 고장률이 안정화 되고, 그 후 점차 운용시간이 사용수명에 근접하는 시점부터 다시 고장률이 상승하는 분포를 보이게 된다. 운용 초기 고장률이 높고 높은 이유는 앞서 언급한 유입결함이 운용 환경 부하를 거치면서 고장으로 발생되기 때문이다. 따라서 ESS의 목표는 장비 배치 초기에 발생할 가능성이 있는 유입결함 제거를 통해 초기의 고장률을 낮추고(①에서②로 이동), 동시에 안정화 시간을 단축함으로써(③에서④로 이동) 장비 신뢰성을 향상시키는 것이다.

ESS 프로세스는 운용환경을 모사한 온도, 진동 등의 환경부하를 장비에 적용한다는 면에서 환경시험 또는 Burn-In 공정과 유사하다. 실제 환경시험과 ESS공정, Burn-In 공정은 그림 2에 나타난 바와 같이 시험대상 및 목적이 명확히 구분된다. 이때 중요한 사항은 ESS 또는 Burn-In은 제조 프로세스 범주에 속하기 때문에 전수를 대상으로 해야 한다는 것과 공정중 발생하는 고장에 대해서는 수락/거부가 아닌 장비 특성을 나타내는 참고 지표로 활용되어야 한다는 것이다. 또한 ESS 프로세스에서 인가되는 환경부하의 강도는 장비의 전기적 기계적 한계를 초과하지 않도록 설정함으로써 과도한 부하로 인해 불필요한 불량률이 야기되거나, 내구수명을 단축시키지 않도록 설계하는 것이 중요하다(Duane, 1986; Hank, 2000).

국내의 무기체계를 생산하는 과정에 있어서 ESS 프로세스는 다음의 과정을 거쳐 최초 설계 및 수행된다. 먼저 무기체계 개발 단계에서 연구개발주관기관은 장비의 ESS 프로세스 수행에 필요한 최초 기준을 설정한다. 개발단계에서 설정된 기준은 국방규격화 과정을 거쳐 양산에 필요한 정식 기준이 되어 체계 양산 시 적용된다. 이 때 최초 개발단계에서 설정된 ESS 프로세스 기준은 양산단계를 거치면서 장비의 특성에 보다 일치할 수 있도록 필요에 따라서 테일러링(또는 최적화) 될 수 있다.

원칙적으로는 장비 및 구성품의 부품 특성 및 복잡도에 따라 설계되어야 한다(MIL-HDBK-344A, 1993). 하지만 이러한 방법은 무기체계 복잡도가 증가할수록 ESS 프로세스 설계를 위한 시간과 비용 투입이 불가피하다. 이는 장비의 작전요능력(Required Operational Capability, ROC)과 같은 주요 성능 발휘 여부에 개발 초점이 맞추어져 있는 국내 개발환경에 적용하기는 현실적으로 어려움이 있는 것이 사실이다. 이에 따라 본 논문에서는 국내의 개발 및 양산 환경에서 현실적으로 적용 가능한(applicable) ESS 수행 모델을 제시하고자 한다.

본 논문에서는 제시하는 ESS 프로세스는 미 국방 핸드북인 MIL-HDBK-344A에서 제시한 대상 장비의 부품 특성(또는 품질) 및 장비 복잡도 등을 고려하여 유입결함을 예측하는 단계를 생략하였다. 대신, 공정 수행 초기에 미 국방 가이드라인에서 제시하는 초기 프로파일 선정 기준을 준용하여 ESS 초기 설계 기준을 제공한다. 이는 국내 무기체계 개발 여건 상 ESS 프로세스와 같은 공정품질 개선을 위한 예산 및 시간 투입이 현

유입 결함(Initial Defect)	고장(손상) 발생(Defect Occurrence)	고장률(손상률) 감소(Defect Rate Reduction)	고유수명(MTBF) 증가(Defect Rate Reduction)	고유품질(Defect Rate Reduction)
고장률(손상률) 감소	고장률(손상률) 감소	고장률(손상률) 감소	고유수명(MTBF) 증가	고유품질
고장률(손상률) 감소	고장률(손상률) 감소	고장률(손상률) 감소	고유수명(MTBF) 증가	고유품질
고장률(손상률) 감소	고장률(손상률) 감소	고장률(손상률) 감소	고유수명(MTBF) 증가	고유품질
고장률(손상률) 감소	고장률(손상률) 감소	고장률(손상률) 감소	고유수명(MTBF) 증가	고유품질

Fig. 2. Comparison of Environmental test & ESS Process

실적으로 쉽지 않은 여건에서 빠른 시간에 경험적으로 검증된 ESS 프로세스 설계 기준 적용이 가능한 방법이다. 또한 초기 프로파일 기준에 따라 ESS 프로세스를 수행한 후 프로파일을 테일러링하는 방법을 제시한다. 그리고 앞서 언급한 방법론을 적용하여 ESS 프로세스를 수행하는 예시를 보이고자 한다. 한편, ESS 프로세스 모델 제시와 별개로 정식으로 국방 규격화되어 현재 양산/운용 중인 유도전자분야 대표 무기체계 2종의 국방규격화 자료에 명시된 ESS 프로파일 현황을 제시한다. 제시된 ESS 프로파일 현황을 통해 현재 적용되고 있는 ESS 프로세스 기준의 미흡함을 제시하고 보완사항을 언급한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서 ESS 프로세스 프레임워크를 설명한다. 본 프레임워크는 ESS 프로세스의 초기 프로파일 설정부터 ESS 수행 후 도출되는 고장 데이터를 기반으로 프로파일을 테일러링하는 전체적인 수행 방법을 포함한다. 또한 현재 양산 중인 A 및 B 무기체계의 국방규격화 자료에 언급된 모든 하위 구성품의 ESS 프로파일 현황을 제시하고 보완사항을 도출한다. 3장에서는 2장에서 언급된 ESS 프로세스 모델에 대하여 예시를 통한 적용 사례를 언급하도록 한다.

2. ESS 프로세스 수행모형

ESS 수행을 위한 접근방법은 크게 ‘Classical’ 방법과 ‘Quantitative’ 방법으로 나뉜다. ‘Classical’ 방법은 구매자(정부)가 구매하고자 하는 장비의 구성품별로 ESS 프로파일(부하종류 및 세기 등)을 명시적으로 규정하는 방법이며, ‘Quantitative’ 방법은 ‘Classical’ 방법과는 반대로 계약자(업체)가 생산하고자 하는 장비에 특성화된 ESS 프로파일을 제시하고 ESS 수행에 따른 고장 및 잔존 고장 수준을 정량적으로 예측하는 방법이다(MIL-HDBK-344A, 1993). 특히 ‘Quantitative’ 방법은 ESS 프로세스 수행 과정에서 발생하는 고장 분포를 분석하고 ESS 프로파일을 테일러링 함으로써 대상 장비의 품질특성에 보다 부합하는 ESS 프로세스 기준을 제시할 수 있다는 면에서 Classical 방법을 보완하는 방법으로 볼 수 있다.

현재 국내 무기체계의 품질 향상을 위한 ESS 프로세스의 적용은 ‘Classical’ 방법에 가깝다. 즉, 장비 개발 시 개발주관기관으로부터 설계된 ESS 프로파일은 양산 시 요구되는 ESS 프로세스의 기준으로 적용되고 있고,

장비의 양산이 종료될 때 까지 변경되지 않고 그대로 적용되고 있다. 이러한 경우, 적용하게 될 ESS 프로파일은 최초 설정되는 개발단계부터 장비 품질수준 분석을 통한 유입결함 수준 등을 정확히 예측하여 향후 양산될 장비의 특성에 잘 맞는 프로파일이 설정 될 수 있어야 한다. 그렇지 않을 경우, ESS 프로파일의 선별 강도가 너무 낮아 충분한 내재 결함을 걸러내지 못하거나, 반대로 선별 강도가 너무 높아 과도한 피로를 누적 시킴에 따라 장비의 수명이 줄어드는 원치 않는 결과를 얻을 수 있기 때문이다. 하지만 1장에 언급 한대로 이러한 방법은 국내의 개발환경에서 적용이 쉽지 않으므로 최초 기준 설계 시 일관성이 있는 실험적으로 검증된 ESS 프로파일 기준을 적용하고 향후 양산 과정을 통해 ESS 프로파일을 보다 최적화하는 방법을 적용하는 것이 현실적으로 적용 가능한 방법일 것이다.



Fig. 3. ESS Process Framework

본 논문에서는 ‘Classical’ 방법의 단점을 보완한 ESS 프로세스 모델을 제안한다. 본 모델은 그림 3과 같이 최초 ESS 프로파일 수행 기준을 제시하여 ESS 프로세스를 수행하고, ESS 수행 결과 발생하는 고장데이터를 활용하여 향후 정량적인 분석을 통한 프로파일 테일러링을 수행한다. 본 방법론은 빠른 시간 안에 적은 비용 투입으로도 ESS 프로세스를 설계하고, 향후 장비 특성에 따른 프로세스 테일러링의 근거를 제공할 수 있는 장점이 있다.

2.1 프로세스 계획

프로세스 계획 단계는 ESS 프로세스 수행 시 요구되는 범위 및 ESS 수행에 따른 위험요소 등을 식별하는 단계이다(Henry, 1989). 그리고 대상 장비의 ESS 프로세스 수행에 앞서 식별된 요소들의 적절한 조합을 결정하기 위한 단계이다. 프로세스 계획 단계에서 고려해야 할 주요 요소는 다음과 같다(UEST, 2003).

- ESS 프로세스 수행 범위
- 부하 종류 및 프로파일 (선별강도)

- ESS 관련 계약 사항
- 자원 가용성 여부(인력 및 장비 등)
- 고장 판단을 위한 기본원칙 등

계약사항, 자원 가용 여부 등은 사업 특성에 따라 다를 수 있기 때문에 본 논문에서는 위의 주요 요소 중 ESS 프로세스 수행 범위, 부하 종류 및 프로파일에 관한 내용만을 다룬다.

먼저, ESS 프로세스 수행 범위는 그림 2 및 표 1에서 나타낸 바와 같이 System, Unit, PCB 등 3단계의 구성품 레벨로 구분할 수 있으며, 각각의 구성품에 따라 전수를 대상으로 ESS를 수행하는 것이 원칙이다. 이는 ESS 프로세스가 장비 제조 후 적합/부적합 판정을 위한 '시험'이 아닌 제조 과정 중 필수적으로 거쳐야 하는 '프로세스'로 인식되어야 함을 의미한다(Duane, 1986).

두 번째, 인가하고자 하는 부하의 종류 및 강도는 ESS 계획 단계에서 고려되어야 할 가장 중요한 요소 중 하나이다. 인가할 수 있는 부하의 종류는 고정온도, 온도주기, 다양한 진동부하, 기계적 충격 등 다양하지만, 온도주기와 랜덤진동 형태가 유입결함을 촉진하는데 가장 효과적인 부하 형태이다(M. Zhao, 2011).

Table 1. Analysis of ESS Effectiveness

구분	부하선정				배치(수행)	
	온도 주기	일정 온도	랜덤 진동	사인 진동	장점	단점
PCB	E	M	M	N	결함제거 비용(낮음)	결함검출 효율(낮음)
장치	E	M	E	M	결함검출 효율(중간)	결함처리 비용(중간)
시스템	E	M	E	M	결함검출 효율(높음)	결함처리 비용(높음)

* E - 매우 효과적, M - 비교적 효과적, N - 비효과적

또한 표 1과 같이 체계, 장치, PCB 등 3단계 구성품 각각에 대한 초기 고장의 촉진 효과는 온도주기 및 랜덤진동 부하 형태가 가장 효과적임을 알 수 있다(MIL-

HDBK-344A, 1993). 따라서 본 논문에서는 ESS 프로세스에 적용하는 부하 종류를 온도주기 및 랜덤진동을 적용하는 수행방법을 제시한다.

2.2 초기 프로파일 설정

'초기 프로파일 선정'은 최초 ESS 프로세스 수행에 필요한 온도 및 진동 프로파일을 결정하는 단계이다. 장비에 따라 유입결함의 수준이 다르기 때문에 최초 ESS 프로파일을 정확히 설정하기 위해서는 대상 장비의 잠재결함 수준을 예측할 수 있어야 한다. 하지만 대상 장비의 결함 수준을 정확히 예측하는 것은 쉽지 않다. 물론 대상 장비를 구성하는 구성품 각각의 부품결합율을 계산하여 상위 구성품의 잠재결함 수준을 정량적으로 예측하는 방법이 MIL-HDBK-344A에 소개되어 있지만, 잠재결함 수준 예측에 소요되는 시간 또는 비용 관점에서 국내 무기체계 개발/양산 환경에 적합하지 못하다.

초기 프로파일 설정을 위해 정량적인 유입결함 수준을 측정하는 대신, 경험적으로 검증된 ESS 프로파일 적용 가이드라인을 적용하도록 한다(MIL-HDBK-344A, 1993). 적용하는 초기 프로파일은 미 3군에서 공통으로 ESS 수행 요구조건으로 적용하기 위해 개발된 프로파일이다. 본 프로파일은 경험적 데이터 및 산업계 통용 기준을 기반으로 제시되었으며, 장비 수명에 영향을 주지 않는 범위에서 초기 고장유형을 효율적으로 촉진하도록 설계된 프로파일이다(TRI-SERVICE, 1993).

Table 2. Baseline Regimen(Thermal Cycling, TC)

특성	구성품 레벨		
	PCB	장치	시스템
온도 범위	-50℃~+75℃	-40℃~+70℃	-40℃~+60℃
온도 변화율	15~20℃/min	10~20℃/min	10~15℃/min
안정화 조건	- 온도 응답이 가장 늦은 부품의 온도가 극한 온도의 15% 이내인 경우		
안정화 후 극한온도에서의 지속시간			
- 모니터 비수행	5분	5분	5분
- 모니터 수행	기능 시험을 수행할 수 있는 충분한 시간		
수행주기수	20 ~ 40	12 ~ 20	12 ~ 20
운용 조건	전원 비인가	전원 인가, 전기적성능 검사	전원 인가, 전기적성능 검사

표 2는 ESS 공정에서 적용 되는 온도주기 부하의 초기조건을 나타낸다(TRI-SERVICE, 1993; Jeffery, 1999). 온도주기 부하의 초기 프로파일 설정 시 온도범위, 온도변화율, 수행주기수는 적용되는 구성품 레벨에 따라 다르게 설정되며, 향후 ESS 프로파일 테일러링 시 장비에 따라 조정되는 필수 설정값이다. 또한 표 2에서와 같이 장비의 설계 규격을 초과하지 않는 범위에서 온도변화율 및 수행주기 횟수는 조정 가능함을 알 수 있다. 그 밖에, 극한 온도에서의 지속시간, 안정화 및 운용 조건은 온도주기 프로파일 수행 시 참고조건으로 고려하여 수행 하도록 한다.

Table 3. Baseline Regimen(Random Vibration, RV)

특성	구성품 레벨		
	PCB	장치	시스템
전체 응답 수준	6 Grms	6 Grms	6 Grms
진동주파수	20-2,000 Hz	20-2,000 Hz	20-2,000 Hz
적용 축수	3	3	3
지속시간			
- 순차적인 축	10분/축	10분/축	10분/축
- 동시적인 축	10분	10분	10분
운용 조건	전원 비인가	전원 인가, 전기적성능 검사	전원 인가, 전기적성능 검사

표 3은 ESS 공정에서 적용 되는 랜덤진동 부하의 초기조건을 나타낸다(TRI-SERVICE, 1993; Jeffery, 1999). 장치레벨에서 진동을 인가하는 장비의 하위 구성품으로 존재하는 PCB의 경우 동일한 진동을 인가할 필요는 없다. 다만 개별 계약 품목으로 조달되는 PCB 품목은 표 3의 진동부하를 인가 할 필요가 있다. 또한, 대상 장비의 진동에 따른 응답을 조사하여 장비 고유의 공진주파수에서의 진동은 배제하도록 한다. 그리고 장비에 과도한 진동이 인가되는 것을 방지하기 위해, 파워 스펙트럼 밀도의 세기는 20Hz에서 1,000Hz사이의 진동 주파수를 ± 3 dB를 초과하여 변하지 않도록 설정하고, 1,000Hz에서 2,000Hz사이에서는 ± 6 dB이상 변하지 않도록 설정해야 한다(MIL-HDBK-2164A, 1996).

3.3 고장데이터 수집 및 분석

개발 또는 양산 중 ESS 프로세스 수행 후 발생한 고장데이터와 운용 중 발생하는 고장데이터를 통합적으로 기록/저장 및 관리할 수 있는 시스템은 성공적인 ESS 프로세스에 필수 요소이다. 대부분의 무기체계 개발 사업에서 개발, 양산 및 운용 단계에 따라서 장비의 품질 관련 정보를 수집하는 주관 부서가 상이한 실정이다. 따라서 사업의 진행 단계에 상관없이 ESS 수행에 따른 품질정보를 통합적으로 관리할 수 있는 시스템 구축이 필수적이라 할 수 있다. 왜냐하면 고장데이터를 기반으로 장비의 ESS 프로파일 테일러링을 수행할 수 있기 때문이다. 고장데이터 수집 시 필수적으로 수집되어야 하는 데이터는 아래와 같다(MIL-HDBK-344A, 1993).

- 인가 부하의 종류
- 부하에 따른 고장발생 시간(주기)
- 대상 장비명 및 레벨
- 고장발생 원인 및 이력 등

3.4 프로파일 테일러링

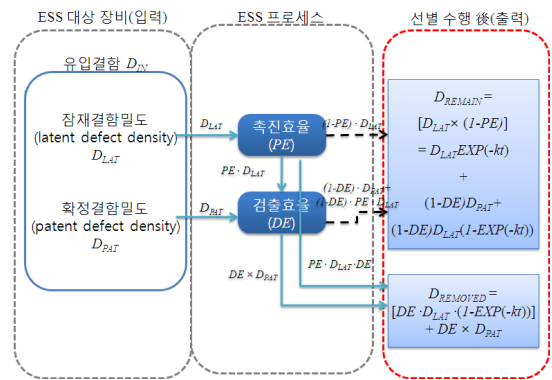


Fig. 4. ESS Process In/Out Model

본 논문에서 제안하는 ESS 테일러링 방법을 이해하기 위해서는 <그림 4>의 ESS 프로세스의 입출력 모델을 이해할 필요가 있다. ESS 프로세스의 입력인 유입결함(D_{IN})은 잠재결함(D_{LAT}) 및 확정결함(D_{PAT})으로 구성되어 있다. 잠재결함은 인가되는 환경부하에 의하여 촉진되어야 고장으로 발견될 수 있는 유입결함을 의미하고, 확정결함은 환경부하 인가 없이 육안 또는 전기적 검사를 통해 고장으로 발견될 수 있는 유입결함을

뜻하며 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_{IN} = D_{LAT} + D_{PAT} \quad (1)$$

한편 ESS 프로세스는 환경부하의 결함 축진 효율에 따른 축진효율(Precipitation Efficiency, PE)과 축진된 결함을 검출하는 효율을 의미하는 검출효율(Detection Efficiency, DE)의 조합으로 나타낼 수 있다. 축진효율은 환경부하의 세기에 따라 잠재결함을 확정결함으로 축진하는 효율을 의미하고, 검출효율은 축진된 확정결함을 고장으로 식별하는 효율을 나타낸다. 축진효율 및 검출효율은 0에서 1 사이의 확률 값으로 표현된다.

ESS 프로세스의 출력은 ESS 프로세스를 통해 제거된 결함($D_{REMOVED}$)과 잔존결함(D_{REMAIN})의 합으로 나타낼 수 있다. 제거결함과 잔존결함은 각각 ESS 프로세스를 통해 제거된 유입결함과 제거되지 않고 장비에 잔존하는 유입결함을 의미한다.

위 언급한 ESS 프로세스의 입출력 관계를 <그림 4>와 같이 표현할 수 있다. <그림 4>에서 주목해야 할 식은 ESS 수행을 통해 제거된 결함($D_{REMOVED}$)이다.

$$D_{REMOVED} = DE \cdot D_{LAT} \cdot (1 - \text{EXP}(-kt)) + DE \cdot D_{PAT} \quad (2)$$

식(2)의 제거결함이 중요한 이유는 ESS 수행 후 발생한 실제 고장데이터를 바탕으로 $D_{REMOVED}$ 의 추정치를 계산할 수 있고, 이는 (2)를 구성하는 변수를 추정할 수 있다. 일반적으로 전기적 시험을 통한 검출효율을 1로 치환할 경우, D_{LAT} , D_{PAT} 및 k 값을 추정할 수 있다. 따라서 (1)식을 이용하여 장비의 잠재결함을 추정할 수 있다.

ESS 선별강도는 ESS 프로세스는 입력 값인 유입결함과 출력 값인 잔존결함의 관계식 또는 축진효율 및 검출효율의 곱의 형태로 (3), (4)식과 같이 표현할 수 있다.

$$SS = \frac{D_{IN} - D_{REMAIN}}{D_{IN}} \quad (3)$$

$$SS = PE \times DE \quad (4)$$

또한, 축진효율은 부하지속시간(t) 및 부하상수에 따라 지수적으로 증가한다는 전제 하에 (5)식과 같이 표현할 수 있다.

$$PE = 1 - \exp^{-kt} \quad (5)$$

식(5)에서 부하상수(k)는 다음의 (6), (7)식으로 나타낼 수 있다(MIL-HDBK-344A, 1993). 즉, 부하상수는 온도주기 및 랜덤진동 등 인가하는 부하의 형태에 따라 프로파일 설정 변수에 대한 식으로 표현한다.

i) 온도주기 프로파일

$$k = 0.0017(\text{TR} + 0.6)0.6[\ln(\text{rate} + 2.718)]^3 \quad (6)$$

(단, TR : 최고온도와 최저온도 차($T_{\max} - T_{\min}$),
rate : 분당 온도변화율)

ii) 랜덤진동 프로파일

$$k = 0.004G1.71 \quad (7)$$

(단, G : 진동의 파워스펙트럼밀도(PSD) 실효치(rms))

앞서 고장데이터를 통해 D_{LAT} , D_{PAT} 및 k 값을 추정할 수 있음을 언급하였다. 이때 추정된 k 값은 온도주기 및 랜덤진동의 부하인가시간(t)에 따른 제거결함(식(2))을 추정하는데 사용된다. 앞서, 유입결함은 (1)에 의해 결정되었고, 시간에 따른 제거결함 또한 (2)를 통해 산출됨을 언급하였다. 따라서 부하 인가 시간에 따른 ESS 선별강도도 (3)을 이용하여 산출할 수 있다.

ESS 프로파일 테일러링을 위한 마지막 단계는 부하 인가 시간에 따른 ESS 선별강도 결과 중에서 2.1.1절에서와 같이 ESS 수행 초기 계획에 따라 근접한 ESS 선별 강도를 선택하고, 선택된 강도에 해당하는 온도주기 및 랜덤진동 부하를 재조정하여 인가함으로써 테일러링이 완성되게 된다.

요약하면, 고장데이터를 기반으로 ESS 입출력 모델에서의 제거결함의 변수를 추정하고, 추정된 결과를 바탕으로 부하인가 시간별 ESS 선별강도를 산출하여 최초 계획된 선별강도 수준을 선택하는 절차로 프로파일 테일러링이 진행될 수 있다는 것이다.

3. 무기체계 국방규격화 현황

현재 양산 진행 중인 유도/전자분야 무기체계 2종을 선정하여 해당 장비의 ESS 수행 요구사항을 분석하였다. ESS 수행 관련 정보는 국방규격서 또는 품질보증요구서 등에 요구사항으로 명시되어 있다. 따라서 장비 생산 업체는 규격화 자료에 명시되어 있는 기준을 적용하여 ESS 프로세스를 수행해야 한다.

국방형상관리정보체계에 등재된 장비 A 및 장비 B 무기체계의 규격화 자료를 근거로 ESS 공정 요구사항 현황을 분석하였다. A체계의 경우, 전체 13종의 규격서 및 56종의 품질보증요구서 중 11종의 장치레벨 및 1종의 PCB 레벨 등 총 12종 구성품에 대하여 ESS 프로세스 요구사항이 명시되어 있다. 한편 B체계의 경우, 전체 8종의 규격서 및 49종의 품질보증요구서 중 6종의 장치 및 4종의 PCB 레벨 등 총 10종 구성품에 대하여 ESS 프로세스 요구사항이 명시되어 있다. 따라서 A, B 체계 각각 12종 및 10종의 규격화 자료를 바탕으로 2.1.4절에서 언급한 (4)식을 이용하여 부하형태별 선별 강도를 산출하였다(단, 검출효율(DE)는 1로 가정). 또한 선별강도 계산에 필수적으로 요구되는 프로파일 변수 중 일부가 누락된 경우에는 해당 장비 규격에서 요구하는 프로파일 변수 중 최소값을 지정하여 계산하였다.

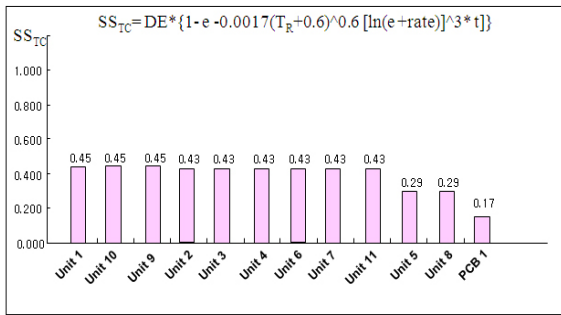


Fig. 5. TC Profiles for Equipment A

<그림 5>는 A체계를 구성하는 12종의 구성품에 대한 ESS 프로파일 중 온도주기 프로파일의 선별강도를 산출한 그래프이다. <그림 5>의 결과를 통해 구성품 레벨이 장치레벨로서 동일한 경우(Unit 1~11)에도 선별 강도가 상이하게 적용되어 있다(표준편차는 약 0.06). 또한, PCB 구성품의 경우, 일반적으로 장치 수준의 구성품보다 선별 강도가 엄격하게 적용되어야 하나 반대의 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그 밖에, Unit 1과 Unit 6의 경우, 표 2에서의 온도 프로파일 권장 요구사항인 전원 인가를 통한 전기적 성능시험에 대한 요구조건이 명시되어 있지 않다.

<그림 6>은 A체계 구성품의 랜덤진동 프로파일에 대하여 선별강도를 산출한 표이다. A체계의 대상 구성품 간 랜덤진동 프로파일 선별강도의 편차 약 0.28로써, <그림 5> 온도주기의 예에서 나타난 결과보다 3배 이상 크게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 Unit 10의 경

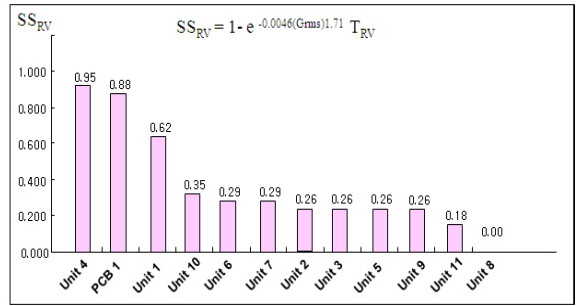


Fig. 6. RV Profiles for Equipment A

우, 진동 프로파일 설정 시 필수 요구사항인 진동 인가 시간이 명시되지 않았으며, Unit 6은 권장 요구사항인 전원 인가를 통한 전기적 성능시험에 대한 요구조건이 명시되어 있지 않다. 한편, 진동시험에 대한 요구사항이 없는 장치(Unit 8)도 확인 하였으며, 앞서 언급한 규격 요구사항의 보완이 필요하다.

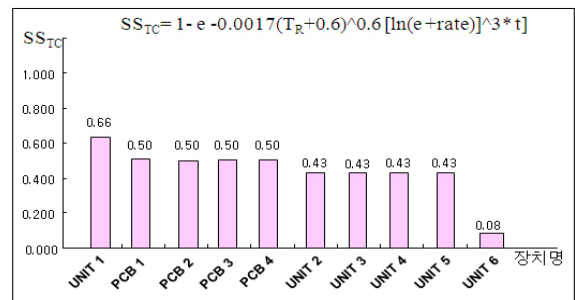


Fig. 7. TC Profiles for Equipment B

<그림 7>과 같이 PCB 레벨 구성품의 선별강도는 0.5로 각각 동일하게 설계되어 있지만 장치레벨 구성품의 경우 선별강도가 다르게 적용되어 있다(표준편차는 약 0.19).

온도 프로파일의 경우와 마찬가지로 PCB 레벨 구성품의 진동 프로파일 선별강도는 0.64로 동일하게 설계되어 있다. 하지만 진동 프로파일의 경우, 랜덤진동 부하가 아닌 사인진동 부하가 적용되어 있다. (MIL- HDBK-344A, 1993)의 사인진동 축진효율 모델을 통한 선별강도 측정 시, 선별강도는 0.01로 선별 강도가 랜덤진동에 비해 현저히 떨어짐을 알 수 있다.

<그림 5>에서 <그림 8>까지 나타난 바와 같이, 유도 전자분야 대표 무기체계 A와 B의 ESS 공정 수행에 필요한 온도주기 및 랜덤진동 부하의 프로파일이 2장에 언급된 기준 없이 선정되어 있으며, 그 결과 장비 및 구

성품 레벨 간 일관성이 결여되어 있음을 알 수 있다. 따라서 현재 규격 자료에 명시된 구성품별 ESS 선별 프로파일의 적용 근거를 명확히 하고 그로 인해 동일 장비 및 구성품 레벨에 따라 ESS 공정 선별 수준에 대한 일관성을 유지 시키는 방향으로 보완이 필요하다. 그리고 향후 장비의 특성에 따른 프로파일의 테일러링도 필요하다.

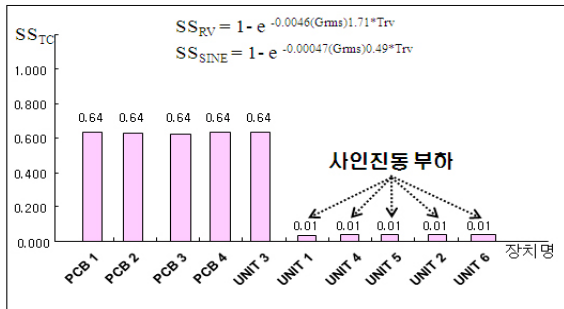


Fig. 8. RV Profiles for Equipment B

4. 사례 분석

4.1 ESS 수행모델 적용 예시

본 절에서는 그림 3의 절차에 따라 본 논문에서 제시한 ESS 프로세스를 적용한 예를 소개한다. 특히 장치레벨의 온도 프로파일에 대한 초기 설정에 대하여 고장데이터를 기반으로 프로파일을 테일러링 하는 것에 초점을 맞춘다.

ESS 대상 장치의 ESS 프로세스 수행 시 우선적으로 할 일은 프로세스 계획을 세우는 일이다. 2.1.1절의 프로세스 계획 단계에서 언급한 요소 중 본 예시에 언급된 장치의 요구 선별강도가 “0.7 이상”으로 설정되었음을 가정하자. 그 후, 최초 온도주기 프로파일 설정은 표 2와 같으며 수행주기수, 온도범위, 온도변화율이 각각 12 cycle, 110도, 10도/분으로 설정되었다(필수 프로파일 변수만 표시하였으며 나머지 요소는 만족한다고 가정).

Table 4. ESS Fallout Data(example)

주기수 (cycles)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	합계
고장개수	5	4	2	1	1	0	2	1	4	1	21

표 4는 최초 설정 기준을 적용하여 ESS 프로세스를 수행한 결과 발생한 고장데이터 정보를 나타낸다. 이때, 주기별 발생한 고장의 개수는 동일한 시간분포에 걸쳐 발생함을 가정한다. 예를 들어 1주기에 발생한 5개의 고장은 0~1주기 시간간격 사이에 동일한 분포로 발생하여 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1주기에 각각 고장이 발생하여 총 5개의 고장이 발생했음을 의미한다.

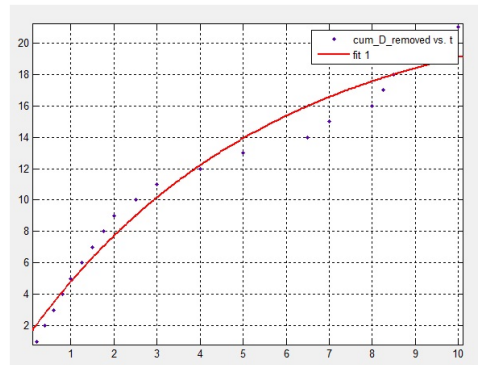


Fig. 9. Cumulative Fallout Distribution

<그림 9>의 점선은 수집된 전체 고장데이터 분포를 나타낸 것이다. 실선은 점선 데이터를 식(2)와 같은 형태의 추세선에 따라 Curve Fitting한 결과를 나타낸다. Curve Fitting은 오차 제곱합(Sum of Squared Error, SSE)을 최소화 하는 조건으로 수행되었다. 수행 결과, 식 (2)의 D_{LAT} , D_{PAT} 및 k 추정 값은 각각 21.36, 1.33, 0.18로 도출되었다. 따라서 (1)식에 따라 유입결함 수는 22.69개로 예측된다.

Table 5. Removed/Remaining Defects & Screening Strength

주기수 (cycles)	유입결함	재거결함	잔존결함	선별강도
1	22.69	4.81	17.88	0.16
2	22.69	7.72	14.97	0.30
3	22.69	10.16	12.53	0.42
4	22.69	12.21	10.48	0.51
5	22.69	13.91	8.78	0.59
6	22.69	15.34	7.35	0.66
7	22.69	16.54	6.15	0.72
8	22.69	17.54	5.15	0.76
9	22.69	18.38	4.31	0.80
10	22.69	19.08	3.61	0.83

유입결함수를 구하였으므로, 2.1.4절의 (5)식을 적용하여 각각의 주기별 제거결함 및 잔존결함, 그리고 그에 따른 선별강도를 표 6과 같이 산출할 수 있다.

3.1절에서 요구 선별강도를 0.7 이상으로 선정하였기 때문에 표 5의 0.76을 선택할 수 있다. 그 다음, 테일러링 된 온도주기 프로파일을 완성하기 위해 (MIL-HDBK-344A, 1993)에 나타난 선별강도 별 프로파일 변수를 매칭해 놓은 테이블을 참조하여 선별강도 0.76의 근사하는 선별강도의 온도범위 및 온도변화율을 각각 80도, 5도/분으로 선정할 수 있다.

Table 6. ESS Profile Comparison

프로파일 변수	초기 설정값	변경된 설정값
주기수	12 cycles	8 cycles
온도범위	110도	80도
온도변화율	10도/분	5도/분

표 6은 최초 설정된 온도주기 프로파일 및 고장데이터를 기반으로 테일러링된 프로파일을 나타낸다. 표 7의 결과에서 중요한 점은 최초 프로파일 선정 및 테일러링 수행 시 정해진 계획 및 검증된 기준에 따라 ESS 프로세스가 수행 된다는 것이며, 이는 ESS 프로세스의 비용대비 효과를 극대화 하기위한 필수 과정이라 할 수 있다.

5. 결론 및 향후과제

5.1 결론

본 논문은 국내 무기체계 개발 및 양산 환경에 적용 가능한 ESS 수행 모델을 제시하였다. ESS 수행 모델은 온도주기 및 랜덤진동 부하의 초기 프로파일을 선정하고, ESS 수행 결과를 기반으로 프로파일을 테일러링하는 모델이다. 특히, ESS 수행시 발생한 고장 데이터를 이용하여 프로파일 테일러링을 수행하는 방법을 소개하고 사례 제시를 통해 제시한 방법의 적용 방법을 언급하였다.

또한, 현재 양산중인 유도전자분야 2종의 구성 장치별 ESS 규격 현황을 통해 ESS 규격 설계 시 기준에 따른 적용의 필요성 및 보완사항을 분석하였다. 본 논문에서 제시한 초기 ESS 프로파일 설정 기준 및 테일러링을 위한 일련의 절차를 통해 ESS 공정 설계 시 공학적으로 검증되고 일관성이 있는 ESS 공정 수행을 기대할 수 있으며, 양산 장비에 특성화된 공정을 수행함으로써 장비별 운용비용 및 품질을 개선하는 효과를 기대할 수 있다.

5.2 향후 연구과제

향후 연구에는 장비의 운용환경을 고려하여 초기 ESS 프로파일을 설정하는 기준을 접목하여 보다 초기 선별 프로파일 설정 기준을 정교화 하는 작업이 요구된다. 이 경우, 보다 다양한 운용환경 별 전자장비의 규격화 자료를 통해 ESS 공정 현황을 분석할 필요도 있을 것이다. 그리고 본 논문에서 언급한 ESS 프로세스 절차 및 테일러링 방법에 대한 효과성을 입증하기 위해 실 사례 분석을 통해 공정 투입 비용 관점의 향후 추가 연구도 필요하다.

참고문헌

- [1] Duane R. Pennington(1986), "Environmental Stress Screening - Some Misconceptions", *The Journal of Environmental Science*, Vol. 29, pp. 26-29.
- [2] Hank Caruso(2000), "Environmental Stress Screening vs. Product Life Consumption", *Journal of the IEST*, Vol. 43, pp. 41-44.
- [3] IEST(2003), IEST-RP-PR001.1 Management and Technical Guidelines for the ESS Process, Institute of Environmental Sciences And Technology.
- [4] Jeffery D. Palmer(1999), "Electronic-Module Environmental-Stress-Screening Data-Evaluation Technique", *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 50-56.
- [5] MIL-HDBK-344A(1993), Environmental Stress Screening of Electronic Equipment, Department of Defense Handbook.
- [6] MIL-HDBK-2164A(1996), Environmental Stress Screening Process for Electronic Equipment, Department of Defense Handbook.
- [7] Zhao, M.(2011), "ESS Profiles with Step Stress Level", *International Conference on Reliability, Maintainability and Safety(ICRMS)*, pp. 1156-1161.
- [8] TRI-SERVICE(1993), Technical Brief 002-93-08 Environmental Stress Screening Guidelines, US TRI-SERVICE.