

생산 공정 자료 기반 양산단계 전차 전장관리체계 환경 부하 선별 시험 방법 및 적용 개선에 관한 연구

김장은^{*†} · 심보현^{*}

^{*} 국방기술품질원

A study on Mass production stage Tank Battle Management System Environmental Stress Screening test method and application improvement based on Production process data

Kim, Jang-Eun^{*†} · Bo-Hyun Shim^{*}

^{*} Defense Agency for Technology and Quality(DTaQ)

ABSTRACT

Purpose: In this study, we apply environmental stress screening (ESS) to battle management system (BMS) of a tank and use the ESS profile based on production process data, guided by MIL-HDBK-781/344/2164.

Methods: To optimize ESS Profile of the BMS of a tank, we estimate ESS model parameters (e.g., defect density, screening strength) using primary production failure reporting and corrective action system (FRACAS) data of military supply contract firm.

Results: First, we collect the Primary production FRACAS data of military supply contract firm. Second, we compute curve fitting approach to find patent defect density and latent defect density using FRACAS data. Third, we solve the equation of Defect Density(patent defect density + latent defect density)(D_{IN}) and Screening Strength(SS) Using second step data. As a result of analysis according to the order, we calculate D_{IN} (Temperature stress case : 74.02, Vibration stress : 10.252) and : SS (Temperature stress case : 0.4632, Vibration stress : 0.4142) and confirm the Condition II-D based on MIL-HDBK-344. According to Condition II-D, it is necessary to modify existing ESS profile through decreasing the D_{IN} and increasing the SS .

Conclusion: Identification of defect causes through ESS approach reduce defect densities for production. It provides feedback to a lessons-learned data base to avoid similar problems on next generation tank BMS.

Key Words : Tank, Battle Management System (BMS), Environmental Stress Screening(ESS), MIL-HDBK-781, MIL-HDBK-344, MIL-HDBK-2164, TRI-SERVICE, Production Process Data

● Received 5 September 2015, 1st revised 17 September 2015, accepted 18 September 2015

† Corresponding Author(jekim@dtaq.re.kr)

© 2015, 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 re-production in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

제품에 대한 신뢰성 개념은 제1차 세계대전 이후 항공기용 엔진 운용 안전도를 비교하는데 처음 사용되었으며, 이후 1930년대 제품 신뢰성 분석을 위한 통계적 품질관리(SQC)를 활용할 수 있는 이론을 정립하였으나 많이 사용되지 않았다. 그 후 제2차 세계대전 중 미국에서 각종 무기체계에 대한 빈번한 고장으로 인해 군 작전제한 및 비용적 손실로 인해 신뢰성에 대하여 전문적으로 연구에 착수를 시작하였으며, 1952년 미 국방성(DoD) 전자기기 신뢰성 자문위원회(AGREE)가 설립되고 1957년 AGREE 전자기기 신뢰성 보고서에서 체계 개발 시 신뢰성 시험을 반드시 수행해야 한다고 강조하고 있다. 그 후 1963년 미 국방성에서 군수품 신뢰성 확보를 위해 MIL-STD-781 (test levels and accept/reject electronic equipment criteria for reliability of non-expendable) 제정하였으며, 현재 MIL-STD-781는 MIL-HDBK-781 (handbook for reliability test methods, plans and environments for engineering development qualification and production)으로 개정되어 미 국방성 군수품 다양한 신뢰성 시험을 위해 활용되고 있다. 또한, 신규 무기체계 초도 양산시 제품공정 안정화를 확보하기 위해 상대적으로 높은 초기고장률을 줄이기 위해 신뢰성 시험 중 하나인 환경 부하 선별 (Environmental Stress Screening: ESS)을 하도록 미 국방성에서 MIL-HDBK-344 (military environmental stress screening(ess) of electronic equipment), MIL-HDBK-2164 (military environmental stress screening process for electronic equipment)를 제정하여 활용하도록 권장하고 있다.

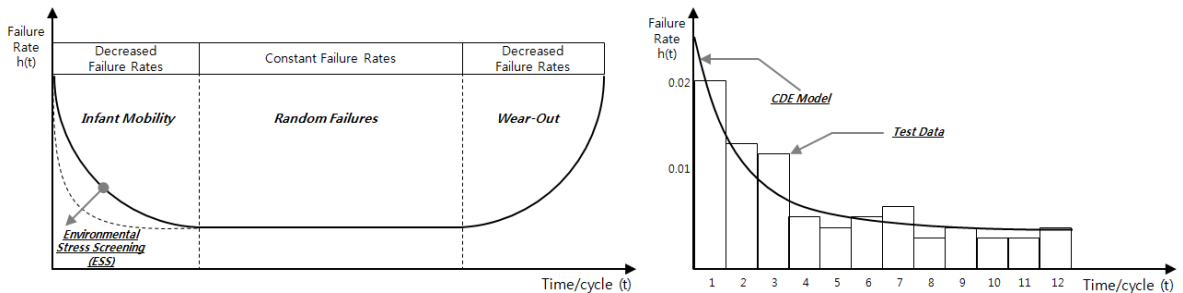


Figure 1. The Bathtub curve and Temperature Cycling Data Fitted to the Chance Defective Exponential Mode (Reference : AFWAL-TR-80-3086 Environmental Burn-In Effectiveness)

신뢰성 시험 중 하나인 환경 부하 선별의 주요 목적은 급속 온도 주기 또는 랜덤 진동과 같은 환경 자극을 유발하는 일련의 과정을 걸쳐 전자 장비의 초기 고장의 원인이 되는 잠재 결함을 유발시켜 고장을 유발한 결함을 빠르게 파악하고 검출/제거/개선하여 <Figure 1>과 같이 비용대비 최적 환경 부하 선별 시험을 통해 육조곡선(Bathtub curve)의 초기 고장기간 동안 발생하는 고장률을 낮추는 것이다.

서론에 이어 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 신뢰성 시험 중 하나인 환경 부하 선별에 대한 문헌연구 및 이론적 배경에 대하여 MIL-HDBK-781/344/2164 중심으로 설명한다. 3장에서는 한국형 전자 전장관리체계의 실제 양산 공정 자료를 기반으로 MIL-HDBK-781/344/2164에서 권장하는 환경 부하 선별 방법으로 접근하여 전자 전장관리체계 환경 부하 선별 시험 절차/분석/개선 방향에 대하여 설명하고, 4장에서 결론 및 향후 연구방향을 제시하고자 한다.

2. 문헌연구 및 이론적 배경

2.1 MIL-HDBK-781A

미 국방부 설계, 개발, 보증, 생산을 위한 신뢰성 시험 방법, 계획 및 환경에 대한 안내서(handbook for reliability test methods, plans and environments for engineering development qualification and production) MIL-HDBK-781A는 각 장비의 야전 배치 형태에 따라 크게 아래 <Table 1>와 같이 6가지 범주에 따라 무기체계 도입 시, 운용 현장에서 요구되는 신뢰성 수준을 만족하고 현장 배치 전에 초기 결함을 제거하기 위한 설계, 개발, 보증, 생산 단계에서의 신뢰성 시험 방법, 시험 계획 및 환경에 대해서 설명하고 있다. 또한 군수품 무기체계, 장비 개발, 보증, 생산 시의 신뢰성 시험에 사용할 수 있는 시험 방법, 시험 계획 및 시험 환경 프로파일을 제공하고 있다 (MIL-HDBK-781A, 1996).

Table 1. Six board categories of Equipment

Category 1	Category 2	Category 3	Category 4	Category 5	Category 6
Fixed-ground equipment	Mobile ground equipment	0.961Shipboard equipment	Equipment for jet aircraft	Turboprop aircraft and helicopter equipment	Missiles and assembled external stores
Wheeled vehicle Tracked vehicle Shelter configuration Manpack	Wheeled vehicle Tracked vehicle Shelter configuration Manpack	Naval surface craft Naval submarine Marine craft Underwater vehicle	Fixed-wing Vertical and Short Take off and landing	Turboprop Helicopter	Air-launched missiles Assembled external stores Ground-launched missiles

본 안내서는 “신뢰성 시험 방법 및 시험 계획”에 관한 부분과 “시험 환경 프로파일” 크게 2가지 주제로 나누어져 있다. 먼저 첫 번째 주제인 “신뢰성 시험 방법 및 시험 계획” 부분은 8가지 분야에 대하여 다루고 있다. 첫 번째 분야는 “신뢰성 성장 모니터링”으로 개발 과정에서 장비의 신뢰성이 시간에 따라 변화한다고 예상될 때, 신뢰성 수준을 예측하고 실제 달성된 신뢰성 수준과 비교하여 신뢰성 관점에서 개발 프로젝트를 관리하는 기법으로서 신뢰성 예측에 대한 방법을 설명하고 있다. 두 번째 분야는 “내구/경제적 수명 시험”으로 내구/경제적 수명 요구 사항을 확인하기 위해 수행하는 시험으로서 운용 환경 및 운용 부하를 반영하여 수명에 영향을 끼치는 품목 수명이 내구/경제적 수명 이상임을 확인하는 시험 방법을 제공하고 있다. 셋 번째 분야는 “환경 부하 선별”로 장비가 현장 배치 되기 전에 초기 결함을 제거하는 데 사용되는 시험으로서 열과 진동의 복합 부하를 사용하며, 주어진 확률로 초기 결함이 제거되었음을 보장하기 위한 시험시간 계산 절차 등을 제공하고 있다. 네 번째 분야는 “평균고장간격(MTBF) 보증 시험”으로 장비의 평균수명이 요구되는 값 이상임을 보증하기 위한 시험으로서 환경 부하 선별이 종료된 이후에 수행하여 초기 결함이 해결되었다는 것을 보증하는데 사용한다. 또한, 일정 시험 구간동안 무고장 기간이 일정 시간

이상이면 합격시키는 방식으로서 일정 시험 구간의 길이 및 합격을 위한 무고장 기간을 설정하는 방법이 제시되어 있다. 다섯 번째 분야는 “축차시험”으로 시험 시간에 대한 제약이 크지 않고 장비의 수명 분포가 지수 분포를 따른다는 가정에서 사전에 결정된 판정 위험률과 판별비에 따른 로트의 합부 판정을 결정하는 방법을 제공하고 있다. 여섯 번째 분야는 “고장기간시험”으로 시험 시간이 제약되어 있을 때, 로트의 합부 판정을 내리거나 MTBF를 추정하고자 할 때 사용되는 시험으로 미리 정해진 시험 시간까지 시험을 수행하여 그 때까지 발생한 고장 개수로 합부 판정을 내리는 방식에 대해 설명하고 있다. 일곱 번째 분야는 “전장비 생산 신뢰성 수락 시험”으로 장비의 생산 과정에서 신뢰성이 저하되지 않음을 보증하기 위해 로트에서 일부 시료를 샘플링이 하는 것이 아니라 전체 로트에 대해 전수 시험에 대한 방법을 설명하고 있다. 마지막 여덟 번째 분야는 “근사 최적 방법”으로 운용의 문제로 시스템 전체를 시험하지 못하고 일부 부품이나 서브시스템을 개별적으로 시험한 경우, 각 부품이나 서브시스템의 시험 결과를 결합하여 전체 시스템의 신뢰도 및 고장률의 신뢰구간추정치들을 구할 수 있는 방법을 소개하고 있다.

두 번째 주제인 “시험 환경 프로파일” 부분에서는 <Table 1>에 따라 6가지 범주에서 겪게 되는 일반적인 환경 프로파일과 이를 모사하기 위한 환경 시험 조건, 환경 시험 수행시 주의사항 등을 다루고 있으며, 시험기기 및 시설이 갖춰야 할 조건과 운용상 유의사항에 대해 설명하고 있다.

2.2 MIL-HDBK-344A

미 국방부 안내서 전자장비에 대한 환경 부하 선별(military environmental stress screening(ess) of electronic equipment) MIL-HDBK-344A는 전자 부품으로 구성된 군수품을 현장에 투입하기 전에 환경 부하 선별 시험을 통해 대상품의 잠재적인 결함을 검출하여 고장원인을 분석하고 개선 조치를 취함으로써 대상품의 신뢰성을 향상시키기 위해 환경 부하 선별 시험을 계획하고 효과에 대해 평가하는 방법에 대하여 제시한 안내서이다. 안내서의 구성은 총 5장으로 이루어져 있으며 1장은 규격의 개요로서 규격의 목적, 적용 대상, 환경 부하 선별의 개념, 규격의 구성, 개발단계와 생산단계에 있어서 신뢰성을 보장하는 방법, 환경 부하 선별을 적용할 때 계량적인 접근방법과 공정능력 및 결함밀도의 개념에 대하여 설명하고 있다. 2장은 환경 부하 선별 시험에 대한 참고문헌을 제시하고 있으며 3장은 환경 부하 선별 시험과 관련된 용어 정의 및 약어 설명하고 있다. 4장은 일반 지침으로 환경 부하 선별의 제약사항과 MIL-STD-785 (시스템 및 장비의 개발과 생산단계 신뢰성 프로그램)와의 상호 관계, 공급자의 협력업체 또는 공급자의 환경 부하 선별, 환경 부하 선별의 계획 방법, 시험 선정 및 배치 방법과 생산단계에 있어서 감시 및 평가 통제 방법, 환경 부하 선별의 비용 대비 생산성 향상 산출 방법에 대하여 기술하고 있다. 마지막 장인 5장은 환경 부하 선별의 세부지침으로서 실행절차를 설명한다(MIL-HDBK-344A, 1993).

환경 부하 선별 시험에서 이야기 하는 중요한 내용은 본 시험을 통하여 군수품 전자장비에 존재하는 모든 결함을 제거할 수 없지만 부품 자체 또는 공정간 4M (man, machine, materials, method) 요소에 의한 부품/구성품은 어느 정도 잠재 결함을 제거할 수 있다. 또한, 군수 장비 운용 초기 고장에 의한 운용 신뢰성 영향을 최소화시키기 위해 기술적으로 그리고 경제적으로 실현 가능한 수준에서 최대한 심각한 결함을 제거해서 설계 신뢰도 또는 요구 신뢰도를 달성하는 것이다. 정리하면, 환경 부하 선별 시험은 군수품의 4M으로 인한 결함 유발하고, 원인을 제거하는 비용으로써 조립된 기기 내에 있는 잠재 결함을 제어하여 이러한 목적을 달성한다. 또한 현장 투입 시점에도 해당 기기 내에 여전히 잠재되어 있을 결함이 목표하는 신뢰성 이내에 있을 수 있도록 보장한다. 이러한 신뢰성을 보장하기 위해 MIL-HDBK-344에서는 정량화된 자료 기반으로 환경 부하 선별 시험 방법을 설명하고 있으며, 아래 <Figure 2>은 MIL-HDBK-344에서 부하 선별에 대한 정량적 접근 방법론을 보여주고 있다.

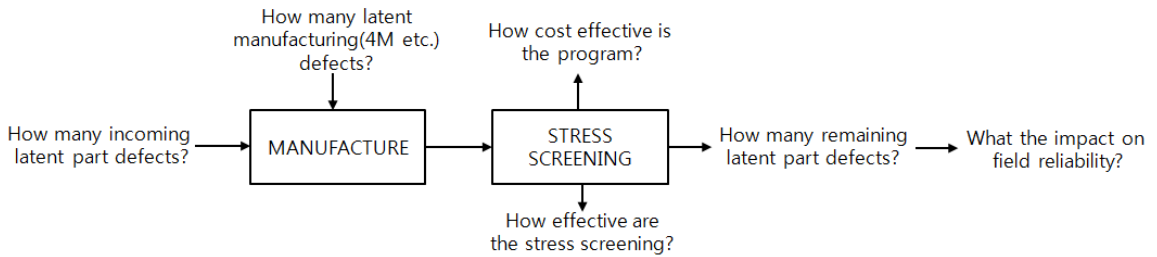


Figure 2. The Quantitative Environmental Stress Screening Problem

MIL-HDBK-344에서 설명하고 있는 환경 부하 선별 프로그램의 이점은 개발-생산 단계에서 적용하는 프로그램으로서 현장 신뢰성을 향상시키고 현장 유지비용을 절감하는 데에 상당한 효과를 거둘 수 있고 이야기하고 있으며, 개발 과정에 환경 부하 선별을 시행하게 되면 품질검사 이전에 많은 잠재 결함 제거/축소할 수 있어 장비 시험에 필요한 상당한 시간과 비용을 절약할 수 있다. 또한, 생산자 입장에서의 이점은 생산과정과 공정에서 신뢰성에 문제가 되는 원인을 상당한 수준에서 파악할 수 있고, 재가공 비용 조정이 유연하며, 생산과정 및 공정에서 신뢰성 문제를 야기하는 원인에 대한 수정 조치를 사용자 환경에 나가기 전에 발생한 결함 사항에 대한 시정이 쉽다. 그리고 정량적 측면의 이점으로 환경 부하 선별 시험에 대한 목표를 수립할 수 있고, 이러한 목표에 부합하는 시험 공정의 계획, 감시, 통제의 근거를 확립할 수 있다. 정량적 접근법을 사용할 때 시험 공정의 상태 및 계약 이행에 대한 정부와 계약자 간 의사소통이 용이해진다. 추가로 고장보고, 분석 및 시정조치 시스템(FRACAS)을 함께 운용하게 되면 정량적 접근법은 생산, 공정, 비용 통제에 잠재된 신뢰도 문제의 원인에 보다 집중할 수 있다.

2.3 MIL-HDBK-2164A

본 핸드북은 전자 장비의 환경 부하 선별 절차 (military environmental stress screening process for electronic equipment) MIL-HDBK-2164A는 환경 부하 선별 절차 수행에 필요한 시험조건, 시험설비, 계측기 사용지침, 진동시험지침, 성능감시지침, 고장보고, 분석, 수정조치 시스템(FRACAS) 절차를 제공하여 장비의 승인 과정에 앞서 해당 장비의 잠재된 결함을 발견하고 수정할 수 있도록 절차/방법을 제시한 안내서이다. 안내서는 총 5장으로 구성되어 있으며 1장은 규격의 범위로서 규격의 목적과 운용영역에 따른 장비의 구분에 대하여 설명, 2장은 환경 부하 선별 절차에 대한 참고문헌을 제시하고 있으며, 3장은 환경 부하 선별 절차와 관련된 용어 정의 및 약어를 설명하고 있다. 4장은 일반적인 사항으로 시험조건, 시험설비, 계측기 사용지침, 진동시험지침, 성능감시지침, 고장보고, 분석, 수정조치 시스템(FRACAS)에 대하여 설명하고 있으며, 마지막 5장은 세부 환경으로서 제조 결함을 검출하는 효과가 증명된 환경 부하 선별에 대한 설명을 기술하고 있다(MIL-HDBK-2164A, 1996).

본 안내서의 주요 목적은 일관성 있는 환경 부하 선별 절차를 제공하여 낮은 속도도와 하자 발생 부품으로 인한 전자 장비의 제조 결함을 효과적으로 파악할 수 있도록 도와주는 것이다. 환경 부하 선별 시험을 통하여 설계상의 근본적인 취약점이 있는 경우/품질검사 및 신뢰성 성장 검사의 관용도가 너무 높은 경우/환경 부하 선별 시험이 수행되지 않은 경우에 대한 문제를 파악할 수 있다.

환경 부하 선별에서 일반적으로 사용되는 시험은 온도변화 시험과 랜덤 진동시험으로 실행 가능한 환경 부하 선별 시험 절차는 동적으로 생산자의 TQM(전사적 품질경영) 일환으로 적극적으로 관리되어야 하며, 시험 대상 장비의 특성/운용환경에 따라 최적화되어야 한다. 그리고 환경 부하 선별은 합격/불합격을 결정하는 일반적인 시험이 아니며, 실행 가능한 엔지니어링 개발, 제작 수정 조치, 정밀점검 활동의 일부로 활용해야 한다.

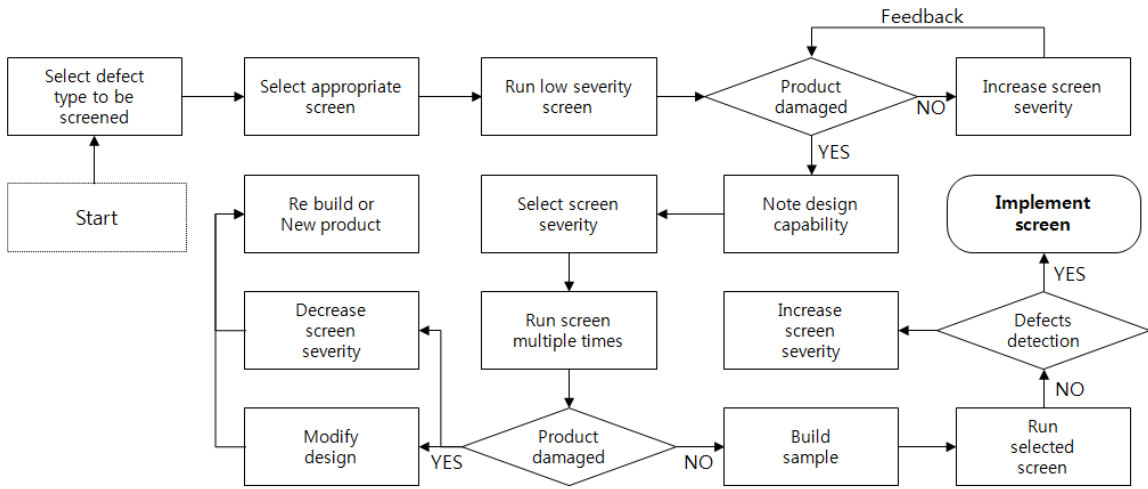


Figure 3. Environmental Stress Screening Development Process

<Figure 3>은 MIL-HDBK-2164에서 권장하는 환경 부하 선별 절차를 개발/적용 하기 위한 전반적인 흐름도이다. MIL-HDBK-2164에서는 계약자를 비롯하여 이러한 계획에 참여하는 사람들은 고장이 생산자에게 등을 돌리는 행위라고 생각해서는 안 된다고 경고하고 있으며, 환경 부하 선별 절차는 운용 환경에 대한 모의시험이 아니라 결함에 대한 모의시험의 일종이다. 이러한 이유로 공장에서 환경 부하 선별에 대한 고장을 제품 신뢰성 향상을 위한 긍정적인 결과로 받아드려야 하며, 환경 부하 선별 절차 고장의 근본적인 원인을 파악하고 공정을 마치기 전에 해당 사항을 수정해야 한다.

3. 환경 부하 선별 시험방법 개선 사례 연구

3.1 전차 전장관리체계 및 환경 부하 선별 시험방법 개선 방향

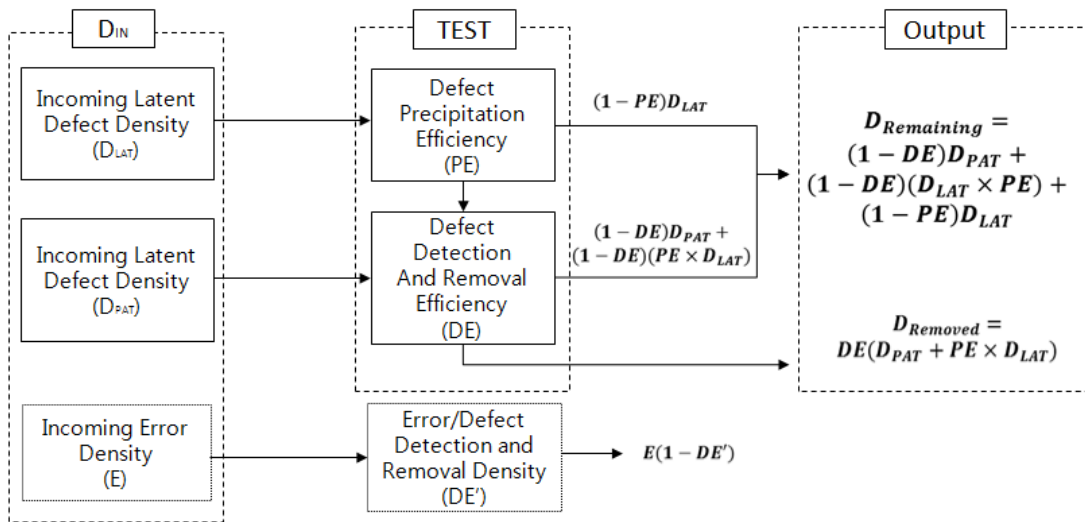


Figure 4. Stress Screening and Variable Relationship(Assumed to be a E=0)

환경 부하 선별 시험 모델의 변수 관계는 <Figure 4>와 같이 입력결함밀도(D_{IN}), 환경 부하 선별 시험, 환경 부하 선별 시험 결과와 같이 크게 3가지로 나뉘 볼 수 있다. 먼저 D_{IN} 은 명백결함(D_{PAT}), 잠재결함(D_{LAT}), 유입오류밀도(E)의 매개변수로 구성되어 있으며 제품 공정 중 유입되는 결함을 의미한다. 그리고 환경 부하 선별 시험은 검출효율(DE), 유도효율(PE)의 매개변수로 구성되어 있으며 환경 부하 선별 시험의 종류와 방식에 따라 결정된다. 마지막 환경 부하 선별 시험 결과는 잔류결함밀도($D_{REMAINING}$)과 제거결함밀도($D_{REMOVED}$)의 매개변수로 구성되어 있으며 환경 부하 선별 시험 후 제품에 남아 있는 결함과 제거된 결함을 의미한다.

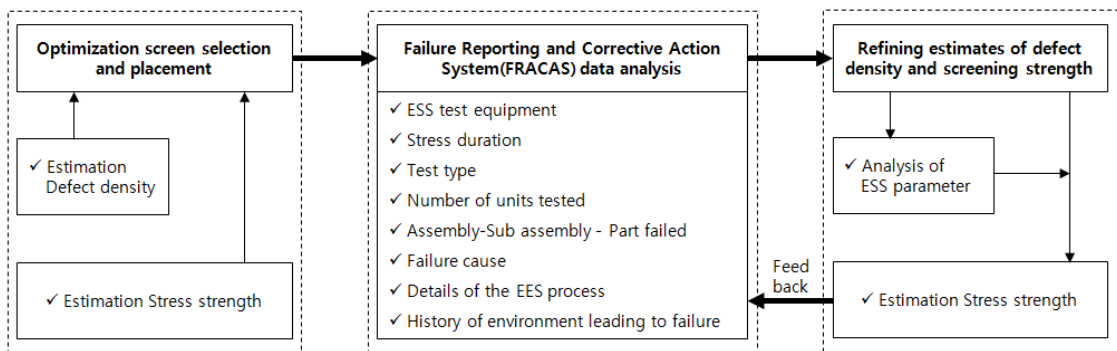


Figure 5. Tank Battle Management System Environmental Stress Screening application procedure framework

<Figure 4>와 같은 환경 부하 선별 시험 모델을 기반으로 환경 부하 선별 시험 방법 수립 및 개선을 정량적인 방법으로 접근할 수 있으며, 접근법에 대한 전체적인 과정은 <Figure 5>와 같다. 첫 번째 단계는 환경 부하 선별 시험 및 배치 최적화를 위한 방법으로 추정된 결함밀도를 근거로 환경 부하 선별 시험 시험강도를 설정하여 적용하는 것이다. 두 번째 단계는 환경 부하 선별 장비, 부하 지속시간, 시험유형, 시험대상 장비 수량, 고장난 부품 수준, 고장원인, 고장을 일으킨 환경 이력 등 생산 공정 중 환경 부하 선별 시험을 통해 획득된 자료를 관리하는 고고장보고 및 시정조치 시스템(Failure Reporting and Corrective Action System : FRACAS) 운영하는 것이다. 세 번째 단계는 FRACAS 자료를 기반으로 환경 부하 선별 시험 정량적 개선을 위해 관련 매개변수를 분석하여 환경 부하 선별 시험 시험강도를 수정하는 단계이며, 마지막 단계는 수정된 시험강도를 적용한 생산 공정 기간 동안 FRACAS 에 환경 부하 선별 시험 공정 자료를 관리하고 일정 기간 후 다시 분석하여 환경 부하 선별 시험에 적합한 시험강도 값을 피드백 형태로 관리한다(Mok and Xie, 1996)(Jeffery, 1999).

3.1.2 환경 부하 선별 시험 선정 방법

환경 부하 선별 프로그램을 수립할 때 첫 번째 단계는 필요 신뢰성을 달성할 수 있는 수준에서 허용 최대 잔류 잠재결함을 결정하는 방법은 크게 비용 대비 효과에 따라 2가지 접근법이 있으며, 첫째로 TRI-SERVICE에서 제공하는 프로파일을 선정하는 방법과, MIL-HDBK-781/344/2164에 따른 정량적인 접근법이 있다. 본 내용에서는 정량적인 접근법을 중심으로 기술한다.

정량적인 접근의 시작은 최대 허용 잔류결함을 결정한 후에는 결함밀도 추정으로부터 방정식을 풀어 필요한 시험 선별강도(SS)를 입력결함밀도(D_{IN}), 잔류결함밀도($D_{REMAINING}$), 제거결함밀도($D_{REMOVED}$)를 이용하여 결정한다.

$$SS = \frac{D_{REMOVED}}{D_{IN}}, \quad D_{REMOVED} = D_{IN} - D_{REMAINING} \quad (1)$$

SS : 선별강도, D_{IN} : 입력결함밀도, $D_{REMOVED}$: 제거결함밀도, $D_{REMAINING}$: 잔류결함밀도

일반적으로 제품 안에 포함된 잠재결함의 수는 독립적으로 동일하게 분포되어 있으며 해당 장비의 결함의 수는 N 과 \bar{P} 의 이항확률분포(binomial probability distribution)로 나타낼 수 있으며, N , \bar{P} 는 아래와 같다.

$$N = \text{장비 총 부품 수}$$

$$\bar{P} = \text{모든 부품에 대한 평균 부품 불량률}$$

여기에서 정의하는 부족품은 생산품 안에서 제거 또는 수리할 수 있는 모든 식별 가능한 품목(전자부품, 납땀, 커넥터)이다. N , \bar{P} 의 두 항은 매개변수 $D = N\bar{P}$ 의 포아송 분포를 이용해서 아래와 같이 근사값을 구할 수 있으며, 결함밀도 $D = N\bar{P}$ 는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$D = N\bar{P} = \sum_{i=1}^m n_i p_i \quad (2)$$

D = 품목 당 평균 잠재결함 수(결함밀도)

n_i : 각 부품 유형*i*에 따른 수량, p_i : 각 부품 유형*i*에 따른 불량률, m : 부품 유형 수

앞서 p_i 의 추정량이 주어질 때, 조립품 시험 이전에 유입 D_{IN} 을 추정하는데 조립품과 대상 시험 장비의 N 및 n_i 을 이미 알고 있기 때문에 식(2)을 사용하여 풀 수 있으며, $D_{REMAINING}$ 또한 유사한 방식으로 풀 수 있다. 식 (2)의 p_i 을 잔류 부족품 결함밀도로 해석할 수 있는 경우는 예외하고, D_{IN} 및 $D_{REMAINING}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D_{IN} = \frac{\text{유입되는 총 잠재결함수}}{\text{로트의 총 장비 수}}$$

$$D_{REMAINING} = \frac{\text{잔류하는 총 결함수}}{\text{로트의 총 장비 수}}$$

3.1.3 고장보고 및 시정조치 시스템 자료 기반 환경 부하 선별 시험 결함밀도 및 선별강도 추정량의 개선
 환경 부하 선별의 가장 중요한 2가지 매개변수는($D_{REMAINING}$)과 선별강도(SS)가 있다. 생산자가 이 2가지 매개변수 분석에 대한 어려운 점은 매개변수 중 어느 것도 직접 관찰할 수 없으며, 오직 공장 환경 부하 선별 시험을 통해서 제거결함만 측정될 수 있을 뿐이다. 이러한 이유로 제품 공정 자료를 이용하여 환경 부하 선별 모델링 매개변수의 추정량을 개선한다. 공정 자료를 이용하여 환경 부하 선별 매개변수를 추정 개선하기 위해서는 FRACAS를 활용해야 한다. FRACAS는 환경 부하 선별 장비, 부하 지속시간, 시험유형, 대상시험 장비 수량, 고장수준, 고장 원인, 환경 이력 정보를 기반으로 분석하는 품질경영 시스템의 한 부분이며, FRACAS 자료 기반으로 환경 부하 선별 시험 결함밀도 및 선별강도 추정량의 개선을 위해 계획된 D_{IN} , SS 와 FRACAS 자료 기반으로 계산된 실제 D_{IN} , SS 를 비교하여 환경 부하 선별 시험 개선 방향을 결정해야 한다. 환경 부하 선별 시험 개선을 위한 첫째 단계로 D_{IN} 을 구해야 하며, D_{IN} 을 구하는 방법은 아래 식과 같이 명백 결함(D_{PAT})과 잠재 결함(D_{LAT})의 합으로 계산할 수 있다.

$$D_{IN} = D_{PAT} + D_{LAT} \quad (3)$$

D_{IN} : 입력결함밀도, D_{PAT} : 명백결함, D_{LAT} : 잠재결함

식 (3)을 이용하여 D_{IN} 을 구하기 위해서 2개의 매개변수인 D_{PAT} 과 D_{LAT} 을 계산해야 하며, 본 매개변수는 RL-TR-91-300 (Evaluation of Quantitative Environmental Stress Screening Methods)에서 기술된 다음식의 곡선맞춤(Curve Fitting)을 통해 구할 수 있다.

$$D_{REMOVED} = DE \times [D_{PAT} + (D_{LAT} \times PE)] \quad (4)$$

D_{PAT} : 명백결함, D_{LAT} : 잠재결함, DE : 검출효율, PE : 유도효율

식 (4)을 이용하여 곡선 맞춤을 계산하기 위해 먼저 검출효율(DE)과 유도효율(PE)를 결정해야 한다. D_{PAT} 를 검출하고 제거하는 능력에 대한 척도로 정의되는 DE 는 <Table 2>와 같이 세 가지(검사의 유형, 검사 중 환경 조건, 결함을 발견하고 위치를 파악하는 능력) 계수에 따라 결정 된다.

Table 2. The product of factors is the detection efficiency

Type of testing performed	Range	Environmental conditions during test	Range	The ability to observe and isolate the defect	Range
Functional only	0.5 ~ 8.8	Testing performed under ambient conditions only	0.2 ~ 0.6	The probability of successfully removing the defect without introducing another	0.8 ~ 1.0
Functional and parametric	0.8 ~ 1.0	Testing performed concurrently with stress	1.0		

환경 부하 선별 시험을 통하여 결함을 유발해서 검출 가능한 상태로 만들 수 있는 척도로 정의되는 PE는 부하 지속 시간의 함수로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

k: 결정된 부하상수, *t*: 부하 지속 시간/주기

식 (5)의 *t*는 부하 지속시간으로 단위는 시간/주기이며, *k*는 각 부하 온도/진동 유형에 따라 결정된 부하 상수로 아래 <Table 3>와 같이 정의할 수 있다.

Table 3. Determine the precipitation efficiency (RADC-TR-86-14)

Type of temperature		Type of vibration	
Temperature Cycling	$k = 0.0017(\Delta T + 0.6)^{0.6} [\ln(\text{Rate} + 2.718)]^3$ $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ in degrees °C Rate = degrees °C/minutes t = number of cycles	Random Vibration	$k = 0.0046 G^{1.71}$ $G = \text{Grm}$
		Swept Sine Vibration	$k = 0.000727 G^{0.863}$ $G = \text{Grm}$
Constant Temperature	$k = 0.0017t(\Delta T + 0.6)^{0.6}$ $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ in degrees °C t = hours	Fixed Sine Vibration	$k = 0.00047 G^{0.49}$ $G = \text{Grm}$

위 과정을 통해 선정된 검출효율(DE)과 유도효율(PE)를 식 (4)에 적용하여 곡선맞춤을 수행하면 2개의 매개변수인 D_{PAT} 과 D_{LAT} 을 구할 수 있으며, 곡선맞춤을 통해 산출된 D_{PAT} 과 D_{LAT} 를 식 (3)에 적용하면 환경 부하 선별 시험 개선을 위한 첫 단계인 D_{IN} 을 구할 수 있다. 환경 부하 선별 시험 개선을 위한 둘째 단계로 SS를 구해야 하며, SS를 구하는 방법은 아래 식과 같이 검출효율(DE)과 유도효율(PE)의 곱으로 계산할 수 있다.

$$SS = PE \times DE \quad (5)$$

DE : 검출효율, PE : 유도효율

환경 부하 선별 시험 개선을 위한 마지막 단계로 앞서 FRACAS 자료 기반으로 계산된 실제 입력결함밀도(D_{IN})와 선별강도(SS)를 계획된 입력결함밀도(D_{IN})와 선별강도(SS)를 비교하여 환경 부하 선별 시험 개선 방향 아래 <Table 4>를 참고하여 결정해야 한다. D_{IN} 의 경우 향후의 결함밀도의 유입을 막을 수 있는 수정조치를 통해 D_{IN}

을 감소시켜 공정 능력을 개선을 개선하고, SS의 경우 시험 유형, 부하 수준, 시험 지속시간 변화를 통해 검사의 완성도 향상을 위해 SS을 증가시킬 수 있다.

Table 4. Comparison of Actual vs. Planned Defect Density (D_{IN}) and Screening Strength (SS) Values

Condition		Comparison		Effect on		Action Required	
		Actual VS Planned		Remaining Defect Density Goal $D_{REMAINING}$	Future Screening Cost	D_{IN}	SS
		D_{IN}	SS			Reduce D_{IN} by Corrective Action	Changes to Screen/Test
I	A	HI	LO	Higher than expected	Increase	Essential	Increase Screening Strength
	B	HI	OK				
	C	OK	LO				
II	D E	HI LO	HI LO	If higher	↑	↑	↑
				Uncertain			
				If lower			
III	F	OK	HI	Lower than expected	Reduce	By Opportunity	Reduce Screening Strength
	G	LO	OK				
	H	OK	HI				
IV	I	OK	OK	Likely to be achieved	Reduce	By Opportunity	No change or eventually reduce

※ Corrective actions should always be taken when the opportunity presents itself and the costs to take actions are reasonable

3.2 전차 전장관리체계 및 환경 부하 선별 시험방법 소개

한국 무기체계 획득 시 환경 부하 시험의 경우 전자장비 군수품 획득 시 초기 품질 안정화를 위해 무기체계 연구 개발 업체에서 획득에 대한 비용 요구조건이 만족될 경우 환경 부하 시험 방법 설계 및 수행을 권장하고 있다(Choi and Lee, 2012)(Kim and Kim, 2015). 환경 부하 시험 방법 설계 경우 국내 주요 전자장비 생산 군수 업체에서 MIL-HDBK-781/344/2164, 실험 값, 장비 요소 등을 고려하여 만든 환경 부하 선별 시험 품질경영 문서를 기반으로 적용/수행하고 으며, 우리가 분석하고자 하는 전차의 주요 구성품 중 하나인 전장관리체계의 형상 및 환경 부하 선별 시험(6주기 수행/진동부하 5분 인가)은 아래와 같다.

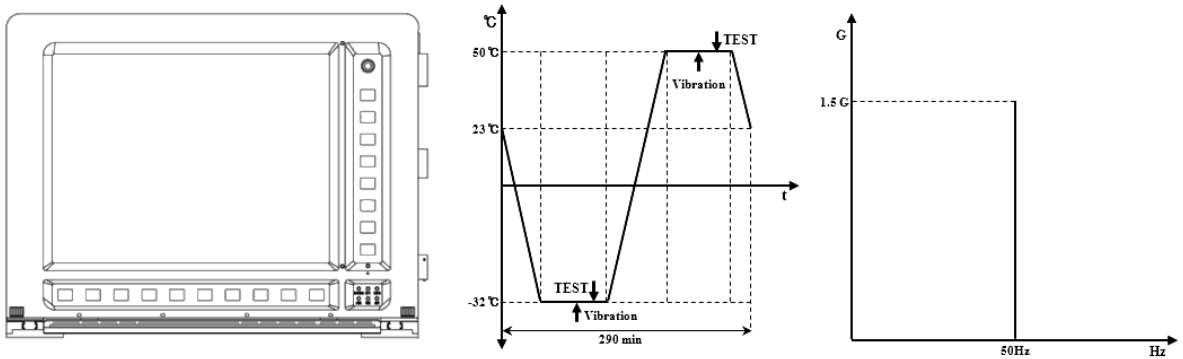


Figure 6. Tank Battle Management System Configuration and ESS Profile

3.3 전차 전장관리체계 생산 공정 자료 분석

전차 전장관리체계 1차 양산 환경 부하 선별 시험에 대한 FRACAS(전장관리체계 생산 공정 자료)자료 분석한 결과는 아래와 같다.

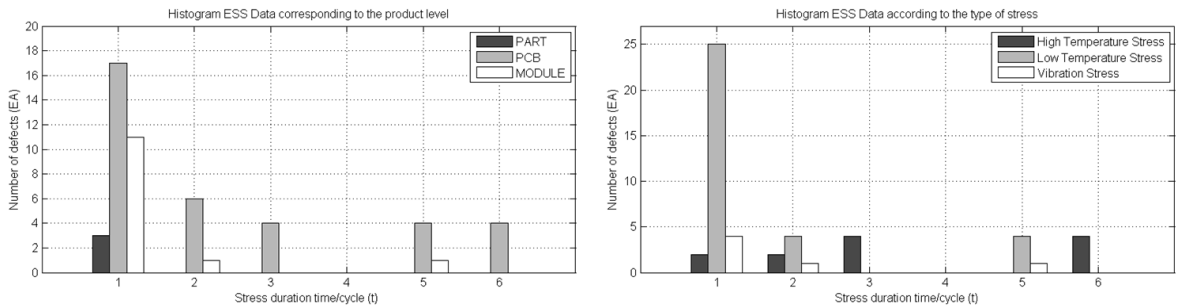


Figure 7. Tank Battle Management FRACAS Data Analysis of Component unit level and Stress type

<Figure 7>은 제품 구성품 단위 수준과 고온/저온/진동 부하단위 관점에서 결함 발생 추이에 대한 것으로 환경 부하 선별 시험 6주기 동안 인쇄 배선 회로 기판(PCB)에서 주로 결함이 검출된 것을 확인할 수 있으며, 온도 부하 시험 시 저온 환경에서 주로 결함이 검출된 것을 확인하였다.

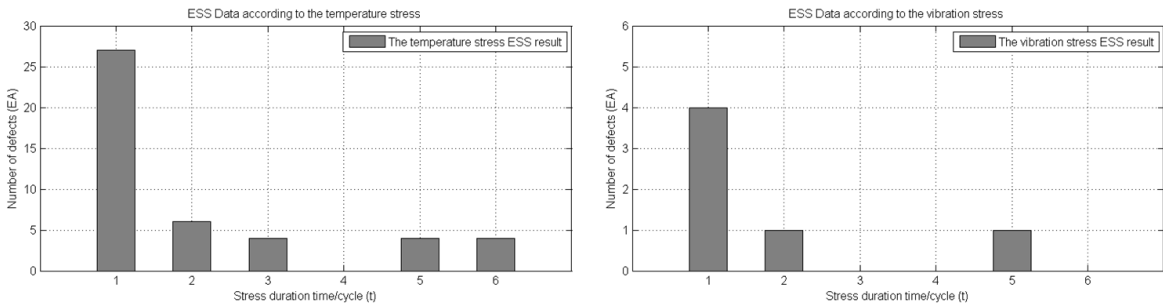


Figure 8. Tank Battle Management FRACAS Data Analysis of Temperature and Vibration Stress

<Figure 8>은 온도 부하와 진동 부하단위 관점에서 결함 발생 추이에 대한 것으로 온도 부하 시험을 통해 검출된 결함 수는 45건 진동부하 시험을 통해 검출된 결함 수는 6건이 검출된 것을 확인할 수 있다.

3.4 전자 전장관리체계 생산 공정 자료 분석 결과

3.3장에서 분석된 FRACAS(전장관리체계 생산 공정 자료)자료 기반으로 전자 전장관리체계의 환경 부하 선별 시험 프로파일 최적화를 위 3.1에서 소개한 순서로 FRACAS 자료 분석을 진행하였다.

먼저 부하 선별 개선을 위한 D_{IN} 는 식 (3)과 같이 D_{PAT} 와 D_{LAT} 의 매개변수로 결정이 된다. 본 매개변수를 구하기 위해서 전자 전장관리체계의 DE 값(온도충격 : 0.81, 진동충격 : 0.81)을 식(4)에 적용 후 곡선 맞춤 한 결과는 아래 <Figure 9>과 같은 형태를 보이며 D_{PAT} 값(온도 : 28.2, 진동 : 4.491)과 D_{LAT} 값(온도 : 45.82, 진동 : 5.761)을 계산할 수 있다. 그 결과 식(3)을 통해 D_{IN} 결과 값이 온도부하 경우 74.02, 진동부하 경우 10.252를 구할 수 있다.

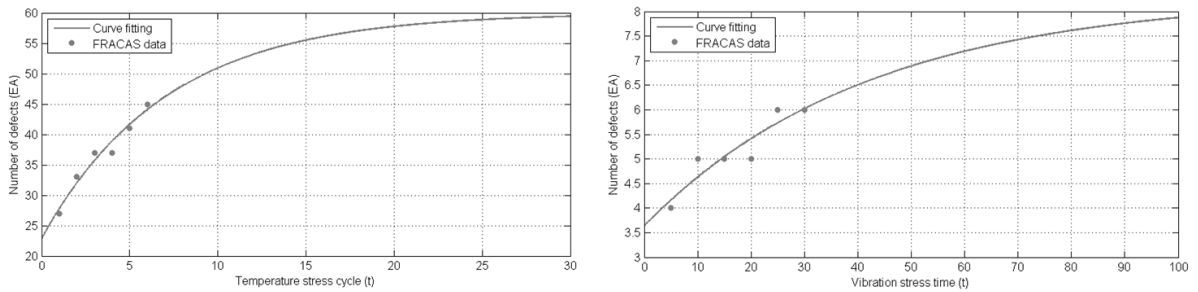


Figure 9. Curve fitting based on Tank Battle Management FRACAS Data

두 번째로 SS 를 계산하기 위해 곡선 맞춤을 해서 얻어진 PE 의 k 결과 값(온도 : 0.1414 ,진동 : 0.02387)을 활용하여 식(5) 이용하여 계산할 수 있으며, 아래 <Table 5>로 각 각각의 매개변수에 따른 계산 결과를 정리 하였다. 아래 <Table 5> 결과를 기반으로 환경 부하 선별 시험 방법 및 개선 적용하기 위해 <Table 4>를 이용 하여 계획된 환경 부하 선별 시험과 실제 환경 부하 선별 시험 결과를 비교 하였다. 현재 D_{IN} 는 계획된 값보다 높게 유입 되며 SS 값을 비교한 결과 온도 부하의 경우 계획된 SS 값은 <Table 3>에 의해 0.4327로 나왔으며, 실제 SS 값은 0.4632로 조건 II의 D로 나온 것을 확인 할 수 있다. 다음 진동 부하의 경우 계획된 SS 값은 <Table 3>에 의해 0.0138로 나왔으며, 실제 SS 값은 0.4142로 조건 II의 D로 나온 것을 확인하였다.

Table 5. Tank Battle Management Environmental Stress Screening result

ESS Temperature Stress					ESS Vibration Stress				
<i>Cycle</i>	D_{IN}	$D_{REMOVED}$	$D_{REMAINING}$	SS	<i>Time (min)</i>	D_{IN}	$D_{REMOVED}$	$D_{REMAINING}$	SS
1	74.0200	27.7358	46.2842	0.1068	5	10.2520	4.1627	6.0893	0.0911
2	74.0200	31.9843	42.0357	0.1995	10	10.2520	4.6286	5.6234	0.1720
3	74.0200	35.6726	38.3474	0.2800	15	10.2520	5.0421	5.2099	0.2438
4	74.0200	38.8746	35.1454	0.3499	20	10.2520	5.4091	4.8429	0.3075
5	74.0200	41.6544	32.3656	0.4106	25	10.2520	5.7348	4.5172	0.3640
6	74.0200	44.0676	29.9524	0.4632	30	10.2520	6.0239	4.2281	0.4142
7	74.0200	46.1627	27.8573	0.5090	35	10.2520	6.2804	3.9716	0.4587
8	74.0200	47.9815	26.0385	0.5487	40	10.2520	6.5081	3.7439	0.4982
9	74.0200	49.5604	24.4596	0.5831	45	10.2520	6.7101	3.5419	0.5333
10	74.0200	50.9312	23.0888	0.6130	50	10.2520	6.8895	3.3625	0.5644
11	74.0200	52.1212	21.8988	0.6390	55	10.2520	7.0486	3.2034	0.5921
12	74.0200	53.1543	20.8657	0.6616	60	10.2520	7.1899	3.0621	0.6166
13	74.0200	54.0512	19.9688	0.6811	65	10.2520	7.3152	2.9368	0.6383
14	74.0200	54.8298	19.1902	0.6981	70	10.2520	7.4265	2.8255	0.6577
15	74.0200	55.5058	18.5142	0.7129	75	10.2520	7.5252	2.7268	0.6748
16	74.0200	56.0926	17.9274	0.7257	80	10.2520	7.6128	2.6392	0.6900
17	74.0200	56.6020	17.4180	0.7368	85	10.2520	7.6906	2.5614	0.7035
18	74.0200	57.0443	16.9757	0.7464	90	10.2520	7.7596	2.4924	0.7155
19	74.0200	57.4283	16.5917	0.7548	95	10.2520	7.8209	2.4311	0.7261
20	74.0200	57.7616	16.2584	0.7621	100	10.2520	7.8753	2.3767	0.7356
21	74.0200	58.0510	15.9690	0.7684	105	10.2520	7.9235	2.3285	0.7439
22	74.0200	58.3022	15.7178	0.7739	110	10.2520	7.9663	2.2857	0.7514
23	74.0200	58.5203	15.4997	0.7787	115	10.2520	8.0043	2.2477	0.7580
24	74.0200	58.7096	15.3104	0.7828	120	10.2520	8.0381	2.2139	0.7638
25	74.0200	58.8740	15.1460	0.7864	125	10.2520	8.0680	2.1840	0.7690
26	74.0200	59.0167	15.0033	0.7895	130	10.2520	8.0946	2.1574	0.7736
27	74.0200	59.1406	14.8794	0.7922	135	10.2520	8.1181	2.1339	0.7777
28	74.0200	59.2481	14.7719	0.7945	140	10.2520	8.1391	2.1129	0.7813
29	74.0200	59.3415	14.6785	0.7966	145	10.2520	8.1576	2.0944	0.7846
30	74.0200	59.4225	14.5975	0.7984	150	10.2520	8.1741	2.0779	0.7874

4. 결론 및 향후 연구방향

본 논문은 전차의 주요 구성품 중 하나인 전장관리체계 FRACAS(전차 전장관리체계 생산 공정 자료)자료를 MIL-HDBK-781/344/2146에서 권장하는 환경 부하 선별 방법으로 접근하여 분석을 진행하였다. 분석결과 온도 부하 및 진동 부하 모두 조건 II의 D로 나와 수정조치를 통한 D_{IN} 에 감소와 SS 증가가 필요한 것으로 개선활동이 요구되는 것을 확인하였다. 현재 환경 부하 선별 시험장비 능력 제한으로 진동 부하 시험을 고정 사인파를 사용하고 있지만 추후 효율적인 환경 부하 선별 시험을 위해 랜덤 진동 부하 형태로 변경 개선하는 것이 향후 제품에 대한 비용 대비 효과 측면에서 효율적일 것이다.

향후 연구방향은 전 세계적으로 무기체계 획득 시 비용대비 효과 측면으로 상용제품(Commercial Off-The-Shelf: COTS)에 대한 적용이 높아지고 있는 추세에 따라 한국 무기체계 획득에도 COTS가 많이 적용되고 있는 것을 고려한 한국형 환경 부하 시험 표준화에 대한 연구를 진행할 예정이다.

REFERENCES

- Jang-Eun Kim, Yong-Hwan Kim, Yun-Sik Jung, and Yu-Seup Cho. 2015 "ESS process standardization study of Tank/Armed car battle management system." Korea Quality Congress, 415.
- Jeffery D. Palmer. 1999, "Electronic-Module Environmental-Stress-Screening Data-Evaluation Technique." Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE Conference Publications, 50-56.
- Jongsoo Choi, and Chang Woo Lee. 2012. "A Study on ESS Process Modeling and Application for Improving Reliability of Electronic Equipments." Journal of the Korean Society for Quality Management 40(3):286-294.
- MIL-HDBK-2164A. 1996. Environmental Stress Screening Process of Electronic Equipment : DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK.
- MIL-HDBK-344A. 1993. Environmental Stress Screening of Electronic Equipment : DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK.
- MIL-HDBK-781A. 1996. Test Methods, Plans, and Environments for Engineering, Development Qualification, and Production : DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK
- Y.L. Mok, and M. Xie. 1996. "Planning and optimizing environmental stress screening." Proceedings Annual International Symposium on Product Quality and Integrity Reliability and Maintainability Symposium, IEEE Conference Publications, 191-198.

