

MTBF 평가를 위한 고장정의 소고 (A Study on the Failure Definition for the MTBF Evaluation)

김 철*

Abstract

MTBF (Mean Time Between Failures) is one of the measures to express the reliability for a repairable system, especially for a military weapon system. But MTBF is meaningless without a clear definition of the system failures. In this paper we discuss two failure definitions, one is defined by US Army Training and Doctrine Command jointly with US Army Materiel Command and the other one is used to M1 Tank.

1. 서 론

MTBF(Mean Time Between Failures)는 수리가 가능한 시스템에 사용되는 신뢰도 척도로서, 특히 군용장비는 대개가 신뢰도의 요구조건이나 신뢰도의 평가를 MTBF로서 표현한다. 그러나 시험자료로부터 MTBF를 추정하는데 있어서 무엇보다도 중요한 것의 하나는 고장을 어떻게 정의하고 판단하느냐에 있다.

예를들어 어떤 시스템의 규격서에 MTBF의 점추정치를 100시간 이상으로 규정하고 있다면 이를 만족하기 위하여 시스템의 고장시간이 지수분포를 한다는 것을 가정할때 시스템의 총 시험 시간을 그 기간중에 발생한 고장회수로 나눈 값이 100시간이상 되어야 하는데 이때 시험중 발생한 모든 결함사항중에서 어떤 것을 고장으로 간주할 것인가 하는 고장정의가 명확히 설정되어 있지 않으면 MTBF는 아무런 의미가 없으며, 따라서 시스템 개발과정에서 일

관성 있는 신뢰도 평가가 불가능하다. 본 논문의 목적은 군용장비의 MTBF를 평가하기 위하여 미 육군에서 적용하고 있는 고장정의를 소개 검토하고 동시에 일반상용 장비의 신뢰도

표 1 주행시험결과 결함사항

(주행거리 : 1,000km)

순 위	결 함 사 항
1	주 전원 스위치를 끄지 않은채 배선작업을 하던중 소화기가 분사됨
2	보병용 상호통신 조종기의 고장으로 송신불능이 되었으나 승무원이 차량탑재용 공구를 이용하여 10분이내 송신가능토록 정비하였음
3	공기덕트 설치용 볼트가 풀어짐
4	트랜스미션 오일 보조회로관의 자동 온도조절장치가 작동치 않음
5	엔진 오일관의 파열

표 2 서로 다른 고장정의에 의한 MMBF 결과 [1]

(주행거리 : 28,000mile)

고 장 정 의	평가기관	MMBF	해 석 방 법
CDC의 고장정의	CDC	232	알려지지 않았음
AMC / CDC의 고장정의	TACOM	89	정비를 연기할 수 없는 사고
임무신뢰도 계수	TECOM	122	부분품의 임무신뢰도 계수이용
비계획 정비활동	TECOM	35	모든 비계획 정비 활동
임무수행불가	TECOM	341	기동 및 사격불능

주 기 : CDC : US Army Combat Development Command
 AMC : US Army Materiel Command
 TACOM : US Army Tank-Automotive Command
 TECOM : US Army Test and Evaluation Command

평가를 위한 고장정의 설정에도 이용될 수 있는 하나의 참고자료로 제공하는데 있다.

2. 배경 설명

앞의 <표 1>은 어떤 군용케도차량에 대하여 1000km주행시험을 실시하던 중 발생한 시스템의 결함사항을 수록한 것이다.

그러면 이 케도차량의 1000km주행시험에서 보인 결함사항을 이용하여 MKBF(Mean Kilometers Between Failures)를 계산할때 고장을 몇개로 결정하느냐에 따라서 MKBF는 그 값이 크게 달라진다.

위의 <표 2>는 미국이 XX-2 시스템을 개발하면서 MMBF(Mean Miles Between Failures)를 평가할때 동일한 시험결과와 자료를 이용하였음에도 불구하고 평가기관들이 각기 다른 고장정의를 사용함으로써 인해서 MMBF의 값이 35mile에서 341mile 까지 변화되고 있음을 보여주고 있다.

실제로 시험을 통해서 수집되고 있는 결함사항에는

- 시스템이 주어진 임무를 수행하는데 크게 영향을 주는 결함(중결함)
- 시스템이 주어진 임무를 수행하는데 어느 정도 영향을 주는 결함(경결함)

- 시스템이 주어진 임무를 수행하는데 아무런 영향을 주지않는 결함
 - 시스템 설계의 잘못에 기인하는 결함
 - 시스템의 제작 불량에 기인하는 결함
 - 시스템 정비시 규정된 정비절차를 따르지 않은 데서 기인하는 결함
 - 예방정비 미실시에 기인하는 결함
 - 정비절차를 규정한 교범의 착오에 의해 발생하는 결함
 - 우발적 사고에 의한 결함
 - 사용자가 신속하게 정비할 수 있는 결함
 - 부대정비 이상의 정비가 필요한 결함
- 등 여러가지 형태의 결함이 발생할 수 있으며, 이때 어떤 것을 신뢰도 측면에서 고장이라고 판단해야 할지 그 판단이 애매한 경우가 많다. 따라서 어떤 결함을 고장으로 판단할 것인가를 규정하는 고장정의를 사전에 명확히 수립되어 있지 않는한 MTBF의 값은 그 의미를 찾을 수 없다.

3. TRADOC / AMC 고장정의

미국의 TRADOC(US Army Training and Doctrine Command)과 AMC(US Army Materiel Command)는 공동연구에 의해 “하나

이상의 필수임무기능을 수행할 능력을 상실하도록 하거나 또는 사용자나 장비에 치명적이거나 중대한 위험이 발생하도록 하는 시스템의 오동작이나 사고”를 운용임무고장(Operational Mission Failure)으로 정의하고 있다 [1].

위의 정의에서 필수임무기능이란, 시스템이 임무를 성공적으로 수행하기 위하여 필수적으로 가져야 할 기능의 최저수준을 의미하는 것으로서 예를들면, 주행속도 50km/hr, 분당발사탄수 3발등과 같이 표현된다.

위의 정의하에 시험중 어떤 결함이 발생하였을 때에 그 결함이 시스템의 필수임무기능을 상실하게 하는 결함인지를 알아내어야 하는데 이를 위하여 사전에 시스템의 필수임무기능을 상실하게 하는 결함의 내용을 파악하여 나열하여야 할 것이나 실제로는 그러한 결함의 내용을 전부 찾아낸다고 하는 것이 매우 어려운 일일 뿐만 아니라 설혹 그러한 결함내용을 전부 찾았다고 하더라도 이를 그대로 적용하기에는 불합리한 경우가 있을 수 있다. 예를들어 궤도 차량의 엔진 냉각용 공기덕트 고정볼트가 풀어지면 기동임무(필수임무기능)를 수행할 수 없게 된다고 하자. 그러나 만약 실제로 시험과정에서 발생한 그러한 결함의 원인이 그 이전에 규정된 조립절차에 따라 볼트를 조이지 않았기 때문에 발생한 결함이었다거나 또는 승무원이 즉각 볼트를 조일 수 있다면 이를 운용임무고장이라고 간주하기가 곤란하다는 것이다.

따라서 여러가지 필수임무기능을 갖고 있는 복잡한 시스템의 경우에는 필수임무 기능을 상실하게 하는 모든 고장내용을 하나 하나 찾아서 운용임무고장내용을 정의 하는 대신에 발생한 결함내용을 검토하여 운용임무고장에 해당되는가를 판단하는절차를 수립하게 된다. 다시 말해서 어떤 시스템의 신뢰도를 평가하기 위하여 발생한 결함내용이 운용임무고장인가 아닌가를 결론지을 수 있게 하는 판단절차를 수립함으로써 이 절차에 의해서 시험중 발생한

결함을 그때 그때 검토하여 운용임무고장 여부를 판가름하는 것이다.

TRADOC/AMC의 고장판단 절차는 아래와 같다.

1 단계 : 발생한 결함사항에 대해서 먼저 그것이 비 신뢰성 결함사항에 해당하는가를 가려낸다.

비 신뢰성 결함사항이란 시험실시전에 실시한 점검 과정에서 발견된 결함사항, 초기고장 배제시험(Burn-in Test)에서 발견된 사항, 야전에서 기대하기 어려운 환경조건으로 시험한 결과 발생한 결함사항등 시스템의 고유한 결함으로 간주하기 어려운 사항이 이에 해당된다.

2 단계 : 비신뢰성 결함사항에 해당되지 않는 결함들중에서 승무원 수리가가능한 결함을 가려낸다.

승무원 수리가가능한 결함이란 승무원의 간단한 정비에 의해서 다시 필수임무기능을 수행할 수 있는 결함을 말하는 것으로서 장비에 따라서는 단순히 장비작동순서를 처음부터 재차 시도하여 보는 것을 뜻할 수도 있다. 따라서 시험도중에 발생한 어떤 결함에 대하여 그것이 승무원수리가 가능한 결함인지 아닌지를 판단하기 위해서는 “승무원이 주어진 공구, 예비부품 또는 수리부속품으로서 _____ 기능에 대해서는 _____ 분 이내, _____ 기능에 대해서는 _____ 분 이내에 수리될 수 있어야 한다”등으로 규정한다.

3 단계 : 앞의 비신뢰성 결함, 승무원 수리가 가능한 결함에 포함되지 않는 결함사항중에서

(1) 필수임무기능을 하나 이상 수행할 수 없게 하는 결함

(2) 인원 및 장비에 치명적이거나 중대한 위협을 초래하는 결함을 가려내어 이를 운용임무 고장으로 판단한다. 그러나

- 어떤 결함 발생이 원인이 되어 또 다른 결함이 동시에 발생(중속결함)하였다 하더라도 운용임무 고장개수는 하나로 간주하며
- 발생된 결함이 (1)또는 (2)에 의해서 운용임무고장 이라고 판단되더라도 만약 그 결함에 대한 정비를 다음번 계획정비시 까지 연기시킬 수 있다고 판단되면 그 결함은 운용임무 고장에 포함시키지 않으며
- 시스템이 필수임무기능을 수행할 수 있는 중복구조를 갖고 있다면 중복구조 전부가 고장 나지 않는한 운용임무고장으로 간주하지 않는다. 이 경우에 중복구조를 이루는 부품은 동일한 성능을 갖고 있어야 한다.
- 보조장비는 중복구조로 간주하지 않으며 주 장비의 결함으로 인하여 필수임무기능을 상실하게 되면 운용임무고장이 발생한 것으로 한다.

결국 TRADOC / AMC의 고장정의에 의하면 필수임무기능을 상실하거나 인원 및 장비에 치명적이거나 위협을 초래하는 결함사항중 비신뢰성결함, 승무원 수리가 가능한 결함을 가려내 나머지 사항중에서 운용임무 고장이 분류되는데 이를 이용 운용임무 MTBF를 계산하게 된다. 그리고 TRADOC / AMC의 고장판단기준에는 시험중 발생한 사고, 사용자의 실수에 의해서 발생한 결함 및 예방정비를 실시 하지 않음으로 인해서 발생된 결함도 운용임무고장에 포함될 수 있으며 시스템의 성능이 점차 저하(degrading)되는 사항은 고려하지 않고 있다.

4. M1 케도차량의 고장정의

M1 케도차량의 고장분류 방법은 M48, M60 케도차량에 적용한 방법을 계속 발전시켜온 것

으로서 [2]에 기술되어 있는 System 고장 및 Mission 고장정의는 아래와 같다.

(1) System 고장

부대정비 사항에 해당하는 결함으로서 차기 계획정비까지 연기할 수 없는 결함. 직접지원 정비 또는 일반지원 정비사항에 해당하는 결함으로서 품목의 대체, 개조 또는 폐기할 때까지의 규정된 잔여수명기간 이내에 정비가 필요한 결함.

위에서 결함이란 정비를 실시하지 않음으로 인하여 작전을 수행할 수 없거나, 작전 수행능력을 저하시키게 되는 시스템의 규정된 성능저하 사항을 말하며 단 아래 사항은 System 고장에서 제외한다.

- 승무원 정비가 가능한 결함
- 어떤 결함의 발생으로 인한 중속 결함
- 시험전, 시험후 기술검사에서 발견된 결함
- 부적절한 운영 및 정비로 인하여 발생된 결함
- 부적절한 환경조건 또는 사고에 의해서 발생된 결함

(2) Mission고장

System 고장중 필수임무기능을 상실하거나 필수임무 기능을 저하시키는 고장.

Mission 고장정의에서 필수임무기능을 저하시키는 고장을 판단하기 위하여 System 고장에 임무신뢰도 계수(MRF : Mission Reliability Factor)를 적용하는데 이는 다음과 같은 개념에서 도입된 것이다. 대개의 시스템에는 시스템의 완전한 고장이 발생되기 이전에 시간이 진행됨에 따라서 어느 정도의 시스템 성능저하가 일어나게 마련이다. 그러나 시스템이 주어진 임무를 수행한다는 측면에서는 시스템의 어느 정도 성능저하라도 임무를 수행할 수 있는 경우가 있을 수 있다. 예를들어 어떤 화기의 최초장비 제작시에 명중율이 90%로 규정되어 있는 경우에 사용중 명중율이 85%로 사격기능의 일부가 저하되더라도 임무수행에는

지장이 없는 것으로 판단될 수 있는 경우가 있다.

따라서 MRF는 여러가지 임무 형태중 어떤 기능상의 고장으로 인하여 임무가 성공적으로 달성되지 못하는 임무수의 비율로서 정의되며 궤도차량의 경우 기동 또는 주포사격 불가시 $MRF=1.0$, 필수임무 기능에 크게 영향을 주는 결함에 대해서는 $MRF=0.8$, 필수임무 기능에 다소 영향을 주는 결함에는 $MRF=0.5$, 필수임무 기능에 경미하게 영향을 주는 결함에 대해서는 $MRF=0.2$, 필수임무 기능에 영향이 없는 결함에 대해서는 $MRF=0.0$ 으로 책정하고 있다.

M1 궤도차량에 적용되고 있는 MRF의 몇가지 예를들면 아래와 같다.

표 3 M1 궤도차량의 MRF 값의 예 [2]

기능	고장내용	MRF
연료공급	• 연료 탱크의 균열 (Major Leakage)	1.0
	• 과도한 연료손실 또는 어떤 고장결과로 160 km 임무수행 능력의 결여	1.0
	• 연료 Line 파열	0.2
	• 연료 Transfer Pump Manifold Valve 고장	0.2
	• 연료 수준 Sensor 고장	0.0

결국 M1 궤도차량의 고장은 System 고장과 Mission 고장으로 구분되며 System 고장은 장비의 성능규격, Mission 고장은 필수임무기능 수준을 기준으로 하여 가려내며 특히 Mission 고장은 장비성능의 저하 과정을 고려하여 MRF를 적용하도록 되어있다. 그러나 실제 이 정의를 적용하기 위하여서는 사전에 예상되는 모든 결함형태(Failure Mode)를 파악하여 그 결함이 필수임무기능에 얼마나 영향을 주게

되는가를 비율로서 MRF를 정하여야 하므로 그 작업이 어렵고 또 설혹 예상되는 모든 고장 형태를 찾았다 하더라도 실제 시험과정에서 수집되는 결함자료에는 예상한 고장형태와는 다른 결함내용들이 있어 MRF를 얼마나 적용해야 할 것인가를 판단하는 것이 쉽지않다는 단점이 있다.

5. 검 토

신뢰도를 평가하기 위하여 고장을 어떻게 정의하고 또 발생된 결함들을 어떤 기준하에 고장으로 판단할 것인가 하는 것은 개발되는 시스템의 특성에 따라 결정되어야 하며 운용장비의 경우 개발자와 군이 협의하여 설정하여야 할 문제이다. 그러나 현재 개발중에 있거나 앞으로 개발할 모든 장비에 대하여 동일한 개념으로 고장을 판단할 수 있는 하나의 기본방침 또는 기준이 필요할 것이다. 고장을 정의하고 판단 기준을 수립하는데 있어서 가장 어려운 점의 하나는 발생된 결함을 어떤 성격의 결함으로 보느냐에 있다. 앞의 2항 배경설명에서 여러가지 결함 형태의 예를 들었는데 어떤 결함이던 어느 하나의 형태만이 아니라 여러가지 형태의 성격을 동시에 지닌다. 예를들면 <표 1>의 2번 결함은 중결함 이면서 승무원이 정비가능하고 Hardware의 설계 잘못에 의한 결함일 수가 있다.

따라서 이 결함을 신뢰도 측면에서 볼때 어떤 결함으로 분류하느냐 하는 것이 바로 고장 정의라고 할 수 있다. 고장을 정의하기 위해서는 먼저 신뢰도와 가용도의 의미를 살펴볼 필요가 있는데 신뢰도는 "어떤 시스템이 주어진 시간동안 정해진 환경조건에서 규정된 성능을 발휘할 수 있는 확률"로서 정의되며 가용도는 "어떤 주어진 시간 t에서 시스템 작동을" 즉 "야전에서 전투임무를 수행할 수 있는 상태의 시스템 가동율"이라고 풀이할 수 있다. 그러

면 신뢰도에서의 “시스템” “정해진 환경조건” “규정된 성능”은 가용도에서 각각 “시스템” “야전” “전투임무를 수행할 수 있는 상태”와 동일한 개념으로 볼 수 있다. 따라서 고장이라고 하는 것은 시스템, 환경조건, 전투임무를 수행할 수 있는 시스템 상태를 어떻게 정하느냐에 따라서 달라지게 된다. 예를들어 발생된 결함의 원인이 어디에 있던간에 승무원이 즉각적으로 수리를 할 수 있을때 그 시스템은 계속 전투 임무를 수행할 수 있는 상태에 있다고 해석할 것인가, 아니면 순간적이지만 전투 수행능력을 상실하였다고 볼 것인가에 따라서 고장정의가 달라지며 MTBF를 계산하기 위한 고장 개수가 달라진다. 따라서 시스템을 Hardware, Software, 사용자 교범 및 정비교범, 정비도구 및 시험장비, 사용자 및 정비요원 전부를 포함하도록 할 것인가, 그리고 전투 임무를 수행할 수 있는 시스템 상태란 장비 생산 규격서에 포함되어 있는 요구조건으로 할 것인가, 아니면 작전 임무를 위해 어떤 필요한 기능수준을 따로 정할 것인가 등이 중요한 문제로 대두된다. 시스템, 환경조건, 전투임무를 수행할 수 있는 시스템 상태를 어떠한 범주로 정하진 정해진 기준하에서 신뢰도 평가는 가능하다고 하겠다. 그러나 시스템의 실제 개발과정에서는 다음 사항이 고려되어야 한다.

첫째 : 운용 MTBF로부터 Hardware MTBF로 전환이 용이하여야 한다.

일반적으로 어떤 시스템을 개발할 때에 군과 개발자는 그 시스템의 임무가 어떤 유형 (Mission Profile)을 갖게되며 또 어떤 환경조건에서 어떻게 운용될 것인가(Operational Mode Summary)를 분석하게 되는데 이것을 토대로 먼저 운용 MTBF를 결정한다. 운용 MTBF는 군 요구조건인 장비의 운용 가용도 (Operational Availability)를 만족시키기 위하여 임무기간 동안의 시스템 신뢰도, 부대의 전투준비상태 (Combat Readiness), 정비부대의

정비가용 인원 및 시간, 정비과정에서 발생하는 행정 및 군수지원 시간을 고려하여 결정된다. 이렇게 결정한 운용 MTBF에는 운용과정에서 발생하는 모든 고장내용을 포함하고 있는 것으로서 개발자는 이것을 다시 Hardware MTBF로 전환하여야 한다. 이것은 운용중 발생할 수 있는 사용자의 실수, 사고에 의한 고장등을 Hardware 설계 및 제작과정에서 고려할 수 없기 때문이다. 그러나 어떤 결함에 대해서 사용자가 즉각 수리를 할 수 있을때 이를 운용상으로는 고장이라고 판단할 수 없으나 Hardware 상으로는 고장이라고 취급하여야 한다던가 아니면 Hardware 상으로도 고장으로 간주하지 않는 것이 타당하다던가 하는 견해 차이가 있을 수 있으므로 Hardware MTBF가 운용 MTBF 보다 더 커야 하느냐 아니면 작아도 되느냐 하는 문제는 고장정의에 따라서 달라질 수 있다.

따라서 시스템, 환경조건, 성능의 범주는 운용가용도로부터 운용 MTBF를 산출하고 Hardware MTBF로 전환이 용이하도록 하며 또한 반대로 시험결과 관측된 Hardware MTBF로부터 운용가용도 평가가 용이하도록 정해져야 한다.

둘째 : 시스템 고유의 결함이 정확히 규명될 수 있어야 한다.

장비개발 과정에 신뢰성이란 개념을 도입하여 설계단계에서나 시험단계에서 이를 적용 및 평가하는 궁극적인 목적은 오랜시간동안 장비가 고장없이 목적하는 바의 기능을 제대로 수행할 수 있도록 하는데 있을 것이다. MTBF의 값이 얼마냐에 앞서 결함발생의 정확한 원인을 찾아내고 이를 보완 또는 개선함으로써만 이 장비의 신뢰성을 높힐 수 있으므로 시스템, 환경조건, 성능의 범주는 개발장비의 시험과정에서 발생하는 결함의 원인이 어디에 있는가를 정확히 가려낼 수 있도록 정해져야 한다.

따라서 위와같은 사항을 고려하여 시스템을 Hardware(Hardware내의 Software 포함), 사용자 교범, 정비교범, 정비도구 및 정비용 시험장비로 국한하고 환경조건을 야전 자연 환경 조건으로 정하고 성능을 전투임무를 수행할 수 있는 최소한의 기능 즉 필수임무기능으로 정한다면 신뢰도 측면에서 고장을 아래와 같이도 정의할 수 있다.

(1) 운용임무고장

장비의 필수임무기능을 하나이상 상실하거나 저하시키는 결과를 초래하는 결함. 단, 아래의 결함은 운영임무고장에 포함시키지 않는다.

- 가. 비 신뢰성 결함
- 나. 규정된 시간내에 사용자 정비가 가능한

결함

- 다. 사용자 미숙 또는 실수에 의한 결함
- 라. 정비요원의 실수에 의한 결함
- 마. 비정상적인 사용조건에 의한 결함
- 바. 우발적인 사고에 의한 결함.

(2) Hardware 고장

운용임무고장중 아래사항에 해당하지 않는

결함

- 가. 사용자 교범 착오에 의한 결함
- 나. 정비교범 착오에 의한 결함
- 다. 규정된 정비도구 자체의 결함에 의해서 발생된 결함

위의 (1),(2)고장정의에 의한 결함분류 방법을 표로 나타내면 <표 4>와 같다.

표 4 결함분류 방안

구 분		Hardware	교 범	도 구	실 수	부적절한 시험조건	사 고
비 신뢰성 결함		X	X	X	X	X	X
계 획 정 비		X	X	X	X	X	X
비 계 획 정 비	사용자 수리가능	X	X	X	X	X	X
	필수임무기능 수행불가	Hardware 고장	운용임무	고 장	X	X	X
	필수임무기능 수행가능	X	X	X	X	X	X

위의 고장정의(1),(2)를 TRADOC / AMC 및 M1 체도차량 고장정의와 비교하면 TRADOC / AMC는 운용임무고장만을 정의하고 있는데대신 위에서는 운용임무고장과 Hardware고장을 정의하였으며 M1체도 차량은 System고장으로부터 Mission고장을 도출하기 위하여 MRF를 적용하고 있으나 위에서는 MRF를 적용하지 않고 있다. 그리고 위의 고장정의를 사용한다면 운용임무 고장은 운용가용

도, 운용 MTBF를 계산하는데 사용될 수 있으며 Hardware고장은 Hardware 가용도 및 Hardware MTBF를 계산하는데 사용될 수 있다. 그리고 <표 4>에서 Hardware의 고장으로 분류된 결함사항에 대해서는 그 원인이 설계, 소재, 제작, 조립, 검사, QA활동등 어디에 있는가를 규명하여야 한다. 그리고 위의 고장정의를 사용하기 위해서는 비 신뢰성 결함, 계획정비, 사용자 수리가능 결함, 필수

인무기능수준등에 대하여 구체적인 정의 또는 기준이 설정되어야 한다.

결론적으로 MTBF평가는 <표 4>와 같은 결함분류방법과 또 결함분류후 어느 항목의

결함을 운용임무고장 또는 Hardware 고장으로 정의하느냐에 따라서 달라 지므로 이는 개발장비의 특성과 장비의 운용분석에 따라서 신중하게 검토하여 설정되어야 할 것이다.

References

- [1]RAM Rationale Report Handbook, TRADOC/AMC Pamphlet 70-11, 1985. 2.1.
- [2]RAM-D Failure Criteria for MIE i Tank, M1 Project Manager office, Warren Michigan, 1983. 5. 2.