

## 상태기반의 창정비 주기 산출 모델

권철<sup>1†</sup> 이승상<sup>2</sup> 김진만<sup>3</sup>

### 내용목차

1. 서론
2. 정비 활동
3. 창정비 주기 산정 방법
4. 열화상태 기반의 창정비 주기 산출 모델
5. 결론

---

1† LIG 빅스원 ILS 연구센터 선임연구원  
(교신저자 Tel: 031-8026-4965 E-mail: ckwon2002@lignex1.com )

2 LIG 빅스원 ILS 연구센터 연구원

3 LIG 빅스원 ILS 연구센터 선임연구원

논문접수일: 2012년 5월 2일 게재확정일: 2012년 7월 5일

논문수정일: (1차: 2012년 6월 12일, 2차: 2012년 6월 26일)

## The Calculation Model of Condition Based on Depot Maintenance Cycles

Kwon, Chul<sup>1†</sup> Lee, Seung Sang<sup>2</sup> Kim, Jin Man<sup>3</sup>

### Abstract

The non-homogeneous Poisson process (NHPP) has been a predominant model for describing the failure patterns on repairable systems. The condition monitoring method utilizes contemporary degradation models that combine component-specific, real-time failure data acquired during operation. This arises with the degradation and reliability characteristics of the component's population to predict and update the residual life distribution (RLD). This study now proposes the decision-making process of depot maintenance cycle using NHPP and condition monitoring method to find the optimum depot maintenance cycle.

*<Keywords> Depot maintenance cycle, condition monitoring, degradation models*

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경과 목적

군은 전력증강을 위하여 첨단 무기체계 개발과 동시에 노후한 무기체계를 효과적으로 유지보수하고 이와 동시에 전력공백을 최소화하기 위하여 다양한 정비개념을 적용해왔다. 또한, 군수지원비용을 최소화하고 효과적인 군수지원체계를 구축하기 위하여 무기체계 개발과 종합군수지원 개발을 동시 진행하는 노력을 기울이고 있다.

창정비 소요는 야전정비 범위를 초과하는 창정비 소요와, 순환 정비 주기에 도달한 창정비 소요(완전 분해 수리)로 구분한다<sup>1)</sup>. 창정비 소요 예측은 군수지원분석 자료를 토대로 산출된다. 일반적으로 체계개발기간 중에는 야전정비 단계까지 개발하고 창정비 시기 도래 전까지 창정비 단계까지 개발하는 것으로 되어 있다. 따라서 창정비 지원요소에 대한 항목은 창정비 주기를 고려하여 전력화 이후에 개발하도록 추진해왔다.

최적 창정비 주기는 수명주기비용(LCC : Life Cycle Cost) 분석을 통해 정량적 판단을 하거나 개발업체의 경험치에 의존하는 정성적 판단을 통해 결정되어왔다. 하지만 이러한 주기결정 방법은 장비 특성과 운용환경에 대해 충분히 고려할 수 없다는 한계점이 있다. 특히 도입장비의 경우에는 해외 업체에서 제공되는 자료에 의존하기 때문에 확실적인 창정비 주기를 적용하게 되고, 불필요한 창정비 소요가 발생하게 된다. 최적 창정비 주기의 설정 연구는 정부(군) 차원에서 수행하는 수명주기비용 최소화를 위한 노력에 부합하여 운용유지비용의 최소화에 기여할 수 있다.

본 연구의 목적은 확일적으로 적용되고 있는 창정비 주기에 대하여 각 장비별 특성과 운용환경을 고려한 개별적인 창정비 주기를 산출하는 것이다. 더불어, 창정비 요소 개발이 전력화 이후 시점에 개발되는 것을 감안하여 해당 시점의 장비 특성데이터(정비 및 운용 제원)를 활용하는 방법을 포함 한다.

### 1.2 연구 방법 및 구성

본 연구에서는 신뢰도 분석의 기준으로 많이 사용되고 고장발생이 일정하다고 가정하는 지수분포 모형에서부터 욱조곡선(Bath Cub)과 같이 실 장비의 고장발생 유형을 나타내는 NHPP (Non-Homogeneous Poisson Process)를 고려한 고장유형에 대하여 고찰하였다. 또한 신뢰도 측정 모수(고장발생률, MTBF<sup>2)</sup>)는 전력화 이후에 수집되는 정비 및 운용제원 등의 데이터를 활용하여 베이지안 접근법을 적용하였다. 이와 같이 추정된 신뢰도 모수는 잔존수명을 예측하고 정비주기를 최산화하는 프로세스에 활용되고 최종적으로 각 장비별 특성이 고려된 창정비 주기를 산출하는 모델을 제시한다.

연구의 구성은 1장 서론에서 본 연구과제의 목적과 배경을 설명하고, 2장에서는 기존

1) 공군규정 7-3 “정보통신시설 정비 및 성능관리” 참고

2) MTBF(Mean Time Between Failures) : 부품, 장치 혹은 무기체계를 동작시켰을 경우의 고장에서 고장까지의 평균시간, 즉 평균고장간격을 말한다. MTBF는 부품, 장치 혹은 컴퓨터시스템 등의 신뢰성(信賴性)을 나타낼 때에 사용하며 이것이 길수록 신뢰성이 높은 것으로 된다.

정비체계에 대한 분석과 정비정책 방향에 대해 분석한다. 3장에서는 기존 창정비 주기 산정 방법과 그 한계점을 소개하고, 4장에서는 NHPP를 고려한 신뢰도 추정 모수를 베이지안 방법으로 추정하고 잔존수명을 계산하여 창정비 주기를 최신화하는 모델을 제시한다. 마지막으로 5장 결론에서는 본 연구의 기대효과와 향후 과제에 대하여 고찰한다.

## 2. 정비 활동

정비는 계획된 작전 운용체계의 요구사항을 만족시키기 위하여 운용중인 장비를 사용 가능한 상태로 보존 또는 복귀하기 위한 활동이며, 이러한 일련의 작업은 접근, 조정, 정렬, 교정, 세척, 분해/결합, 검사, 설치, 주유, 완전분해 수리, 재생, 제거 및 설치, 교환, 수리, 근무, 시험 등을 포함한다.

### 2.1. 정비 체계

#### 1) 정비 계단

현재 군에서는 3계단/5계단 정비체계를 적용하고 있다. 1, 2계단정비(3계단 정비 시 1계단)는 부대정비로써 장비 운용부대 지휘관 책임 하에 예방정비 수준의 정비를 실시한다. 1계단 사용자 정비는 수입, 주유, 조정 또는 부분품 교환을 수행하고, 2계단 정비는 부분품 또는 조립체 단위의 교환정비를 실시한다. 3, 4계단정비(3계단 정비 시 2계단)는 야전정비로써 정비대대의 고장 수리부속에 대한 교환 및 수리를 실시한다. 5계단(3계단 정비 시 3계단)는 창정비로써 군 정비창 또는 국내업체나 해외 정비업체에서 수행하게 되며 수리부속은 신품 수준으로 재생 정비를 하고, 완성 장비는 완제품을 완전분해, 검사, 수리, 재생하는 오버홀(Overhaul) 정비를 실시한다.

#### 2) 정비 목적

정비의 목적은 장비의 운용 가용도 극대화에 있다. 소요군은 장비 운용 시에 발생되는 결함 사항을 낮은 수준의 정비계단에서 정비할 수 있도록 보다 효율적이고 체계적인 정비지원 체계를 수립해야 하고 이를 통해 필수적인 임무수행이 원활하도록 해야 한다.

#### 3) 정비 구분

정비는 운용자가 수행하는 간단한 예방정비로부터 지원부대에서 실시하는 야전 및 창정비에 이르기까지 그 범위가 광범위하다. 또한, 군내에서 정비가 불가능 것은 국내 민간업체 또는 해외 생산업체에 정비를 의뢰하게 된다. 이와 같이 장비를 정비유지하기 위하여 효과적인 정비지원 체계를 구성하고 정비 범위와 책임 한계를 설정하는 것이 정비구분이다.

정비는 부대 기본임무, 편제장비, 가용한 기술 인력과 보급지원 등의 제반요소를 고려하여 군 정비(부대정비, 야전정비, 창정비), 외주 및 국외정비 등으로 구분할 수 있다. 군 정비는 군부대에서 실시하며 장비정비의 가장 핵심이 되는 정비이다.

(1) 부대정비

- A. 장비가 탑재된 상태에서 수행되는 정비이며 부대 정비요원에 의해서 실시된다.
- B. 해당 교범 및 운용 지침서 기준의 부대정비 범위는 다음 사항을 포함한다.
  - a. 외부 및 접근이 용이한 구성품 및 기계, 전기 장치에 대한 검사, 주유, 세척, 보존, 조임, 교환, 수리
  - b. 손상이나 결함 품목의 정비 전후에 중요한 조정이나 측정이 필요치 않는 품목의 정비
  - c. 부대정비 지원장비를 사용하는 정비
  - d. LRU(Line Replaceable Unit) 교체
- C. 부대정비는 개발된 계획정비제도에 의거 주기적으로 실시하며, 운용전·후 자체고장진단(BIT)에 의한 고장을 정비하는 비계획 정비업무를 수행한다.

(2) 야전정비

- A. 부대정비 능력을 초과한 정비작업으로 회로카드조립체(CCA : Circuit Card Assembly), 모듈 및 조립체 고장진단 및 교체를 주임무로 하며 가능할 시 사용불가 품목 및 결함체의 수리 조정 작업을 실시하는 정비이다.
- B. 야전정비는 야전부대에 의하여 수행되는 정비로써 전문 기술요원에 의한 수리부속품의 교환이나 수리 등 각종 정비근무 지원을 말한다.
- C. 야전정비는 개발된 계획정비제도에 의거 주기적으로 실시하며, 일반적으로 운용전·후 자체고장진단(BIT : Built In Test)에 의한 비계획 정비업무를 수행한다.

(3) 창정비

- A. 창정비 시설에서는 후송된 장비 및 품목을 분해, 수리재생 작업을 하며 창정비 작업 요구서에 의거 수정작업을 실시한다.
- B. 후송된 장비는 창정비 시설에서 전문적인 기술검사를 실시하여 경제적인 수리 한계 및 기본품목 재생 가부를 판단하여 폐기 또는 재생 여부를 결정한다.
- C. 폐기판정 장비는 해체하여 필요한 부속은 동류 전용한다.
- D. 경제적 수리한계 초과 정비의 폐검정권<sup>3)</sup>을 갖는다.

(4) 외주정비 및 국외정비

정비부대에서 정비가 불가능하거나 국내외 생산업체 또는 정비업체에 정비를 의뢰하는 것이 경제적인 경우에 외주 재생과 외주 수리로 구분한다.

3) 육군규정 432 장비 및 물자정비규정 : 폐기 및 검정에 대한 권리로 외주정비 시 모든 품목에 대하여 폐품, 설물의 처리권과 함께 군에서 보유하고 있는 권리임.

#### 4) 정비 업무

##### (1) 계획(예방) 정비

장비를 항상 양호한 가동상태로 유지하기 위해 손질, 주유 및 간단한 부속품 교환을 주기적인 검사에 의해 고장발생 이전에 실시하는 정비를 말한다.

##### (2) 비계획(고장) 정비

비계획정비는 체계가 운용중 고장 혹은 기능결함이 발생할 때 실행한다. 비계획 정비의 목적은 체계 운용을 방해하는 원인을 찾아서 그 부품을 교환, 수리 또는 조정해서 신속히 체계를 가동상태로 회복시켜 주는데 있다.

##### (3) 완전 정비(Perfect Maintenance)

완벽한 정비란 예방 정비 과정 및 정비의 결과에 따른 시스템의 상태를 말한다. 즉 정비 후 시스템의 상태는 ‘새것과 같은 상태(As good as new ones)’가 되는 것을 말한다.

##### (4) 불완전 정비(Imperfect Maintenance)

현실성과 정비의 한계성을 고려한다면 그 시스템은 완전히 새것과 같은 상태가 되지 않는 경우도 있다. 즉, 정비 후, 인간의 실수나 정비 실행 과정에서 생긴 손상 또는 환경적인 요인 등으로 인하여, 시스템은 ‘새것과 같은 상태’가 안 될 수 있으며, 시스템의 상태는 ‘새로운 제품(Brand new ones)’ 보다는 못하지만 ‘완전히 고장 난 것보다는 좀 더 보수 된 상태’을 나타낸다.

### 2.2. 정비 정책 방향

오늘날 방위산업은 현대 기술의 발달에 따라 무기체계가 점점 정교해지고 복잡해지고 있다. 점점 복잡화 되어가는 무기체계에서 노화나 예기치 못한 시스템의 고장으로 인하여 발생하는 파급 효과는 무기체계의 전력화 공백과 총수명주기비용 상승이다. 이런 이유로 정부(군)에서는 수명주기비용을 최소화하려는 노력이 기울여지고 있다. 다양한 운영 시스템의 선진기술도입과 비용절감방안에 대한 대책이 수립되고, 총수명주기체계관리(TLCSM : Total Life Cycle System Management)와 같은 선진기술도입을 통한 수명주기 비용절감과 무기체계 가동률향상을 계획하고 있는 것이다. 또한 총수명주기체계관리와 더불어 보다 효율적인 무기체계의 운용을 위하여 성과기반군수지원(PBL : Performance Based Logistics)의 개념을 접목시켜 효과를 극대화하는 등, 정비비용 절감과 장비가동률을 향상시키기 위한 다양한 정비정책이 도입되고 있다.

#### 1) 정비전략의 변화

표 1은 상태기반정비(CBM : Condition Based Maintenance)를 포함한 정비활동에 대한 다양한 접근방식을 보여주고 있다.

상태 기반의 창정비 주기 산출 모델

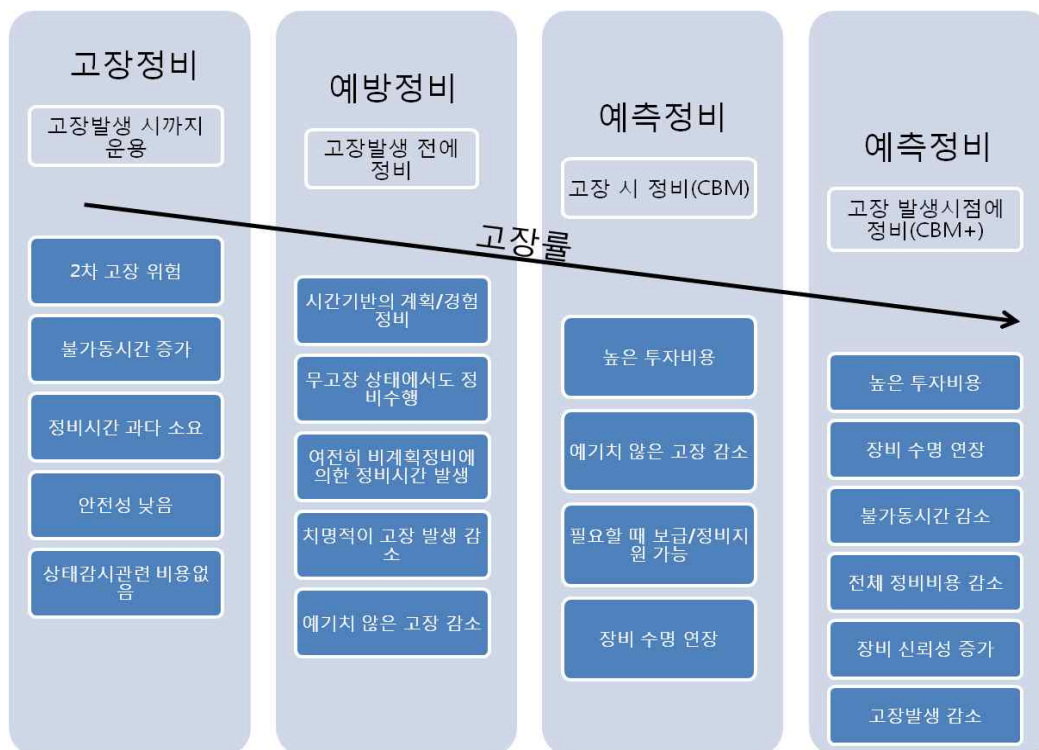
<표 1> 정비활동에 대한 접근방식

범주	사후정비	사전정비		
	고장정비	예방정비	예측정비	
세부설명	고장 발생할 때까지 사용하고 고장 시에 수리	계획된 일정에 따라 정비수행	상태기반정비 - 고장 유무진단 : CBM	상태기반정비 - 고장발생을 예측함 : CBM+
정비시점	고장발생 시	검사, 수리를 위한 고정된 시간기반의 정비	현장비상태기반의 정비	잔존수명 예측을 기반으로 정비
계획정비 목적	-	계획된 시간을 기반으로 점검 및 교체를 수행함으로써 고장의 영향을 사전에 예방	고장여부에 대한 진단으로 불필요한 정비 최소화	고장을 예측하여 적시에 정비
일정 수립 방법	-	설계기간 중 예측한 장비의 운용시간과 경험 제원을 기반으로 계획일정 수립	연속적인 상태 감시 데이터 수집	장비에 가해지는 스트레스를 기반으로 잔존수명 예측
예측 도구	None	None	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Statistical Process Control</li> <li>· Autoregressive Model</li> <li>· Support Vector Machine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Autoregressive Moving Average model</li> <li>· Elman recurrent neural network prediction tool</li> <li>· Match Matrix prediction tool</li> </ul>

CBM에 대한 정비 개념이 도입되기 전에는 정비활동이 대부분 시간 기반의 계획정비 중심이었으며, 주요한 정비는 월간, 반기, 연간 등 사전에 정한 시간 구간을 기반으로 이루어졌으며, 정비활동은 과거 평균 고장률, 공학적 예측 또는 사전 정의된 시간 주기에 따라 수행되었다. 하지만 이러한 많은 정비 활동은 현재 운용 환경적 요소, 작전 수행 요소에 의한 특수한 조건에 대응하기 어렵다. 시간 기반 정비는 용이한 계획 수립의 장점이 있지만 예측하지 못한 고장에 대한 대응이 어렵고 수동적 또는 자동적 상태 검사의

이점 또한 없다. 시간 중심 정비가 고장을 예측하여 정비하려는 의도는 있지만 실제 장비 상태에 대한 평가 없이 진정한 예측 정비는 요원하다. 무기체계와 장비의 정비를 수행하는 다양한 정비 접근법이 필요하며, 실례로 미 국방성의 유지보수 정책은 무기체계의 작전 수행 능력을 극대화하기 위하여 고장을 사전에 예측하고 조치하는 전략을 추구하고 있다. 시간 중심의 계획정비와 상태 기반의 정비는 각각 긍정적인 면과 부정적인 면이 있다. 예를 들면, 시간에 따라 소모품을 교체하는 계획정비는 고장을 줄일 수는 없지만 정비 소요를 줄이며, 운용 가용도를 향상시킬 수는 있다.

일반적으로 장비의 특성과 환경을 기반으로 수행되는 정비 접근법은 유용하며 더 효율적으로 사전 정비 전략을 수행함으로써 실제 장비의 고장을 줄이고 전체 무기체계의 수명 향상 및 총 수명주기 비용을 줄여주는 효과가 있다. 그림 1은 이러한 내용을 보여주고 있다.



<그림 1> 정비 정책 변화에 따른 고장률 변화

CBM+의 다양한 기능을 사용한다는 것은 잠재 고장 발생 환경에 대하여 탐지하고 예측하여 고장발생 전 고장에 대한 대응력을 향상시키는 것이다. 무기체계의 상태를 기반으로 정비를 수행하는 CBM+은 예방정비 프로그램에 대한 향상된 효율성과 더 좋은 운용성을 제공하는 유용한 도구이다. 그림 2는 CBM+을 수행함으로써 정해진 시간에 무조건 수행해야하는 예방정비와 고장발생으로 인한 고장정비 감소로 총 정비 소요를 줄일 수 있다는 개념을 나타낸다.

## 상태 기반의 창정비 주기 산출 모델



<그림 2> CBM+ 정비정책의 효과

현재 군의 무기체계의 정비방식은 구성 부품의 수명시간이 도래하면 정비/교환 하는 시간 기반 정비방식(TBM : Time Based Maintenance)이 사용되고 있다. 그러나 무기체계 부분품의 수명은 운용된 환경이나 여러 가지 기계적 요인으로 단축이나 연장 될 수 있다. 따라서 일반적인 시간기반 정비 방식은 사용 가능한 부분품의 교체에 따른 예산 및 정비인력의 낭비가 있다. 운용 중 예상하지 못한 부품의 마모나 고장에 의해 무기체계의 운용이 불가하게 되거나 잠재적인 큰 위험이 될 수 있기 때문에, 현재 부품의 상태를 진단하여 정비 및 교환 하는 CBM이 더욱 경제적이고 기체의 안전을 보장할 수 있는 효율적인 정비방식이다.[6] 그러나 이를 위해서는 부분품의 현재 상태를 정확하게 진단하고 가용한 잔여 운용시간 및 교체 필요시기를 정확히 판단하는 것이 무엇보다 중요하다. 모든 기계적 부분품들은 진동, 소리, 열, 주파수 등과 같은 특징적인 신호를 나타내며, 이러한 신호들은 무기체계의 운용에 따른 부분품들의 작동 및 마모를 나타내는 것이다. 이 신호들의 특성을 분석하여 구성품의 현재 상태를 진단하고 잔여 운용시간 및 정비 필요시기를 예측할 수 있다. 이렇게 함으로서 무기체계 부품의 교체 및 정비를 현재 장비의 정확한 상태를 기준으로 실시 할 수 있는 것이다. 이러한 진단 방법을 응용하여 실시간으로 측정된 무기체계의 상태를 군수지원요원이 인지할 수 있다면 무기체계의 안정적인 운용에 큰 도움이 될 수 있다.

### 3. 창정비 주기 산정 방법

#### 3.1 경제성 분석을 통한 창정비 주기 산출

무기체계의 체계개발 단계에서는 대부분 야전정비 수준까지의 종합군수지원 업무를 수행하나 양산 단계로의 전환 시 군 본부 기획부서에서는 창정비 수행관련 예산 결정과 창정비 계획 의사결정이 필요하여 주기적 외주 창정비의 효용성 검증과 최적 창정비 주기 결정에 필요한 비용 모델을 산출한다. 이에 이상엽[4]의 “경제성 분석을 통한 외주 창정비주기”에서는 주기적 외주 창정비의 효용성 검증을 위한 대안으로 창정비를 수행하지 않을 경우와 수행할 경우를 비교하여 검증할 수 있고, 창정비 주기(대안 1, 2, ..., n)에 따른 비용이득을 분석하여 최적 창정비 주기를 결정할 수 있는 창정비 비용 산출모델을 제시하였다.

##### 1) 창정비 비용 구조 모델링

창정비 수행 여부에 따라 다음과 같이 운용유지비용의 구조 및 고장정비주기가 달라지며, 고장정비주기의 변화는 창정비 비용 산출모델에 많은 영향을 준다.

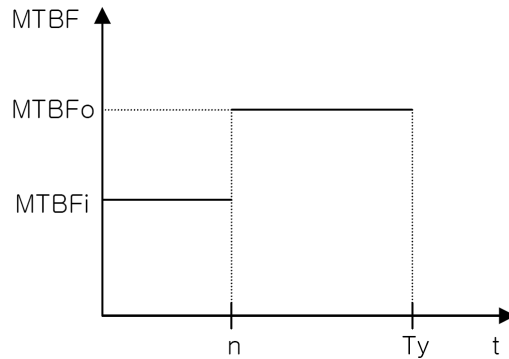
- 창정비 미수행시의 비용 = 고장정비주기×(정비소요시간×요원수×시간당인건비 + 소모품비+기회비용)
- 창정비 수행시의 비용 = 고장정비주기×(정비소요시간×요원수×시간당인건비+ 소모품비)+창정비주기×(정비소요시간×창요원수+소모품비)

##### 2) 창정비 수행 시 고장간평균시간(MTBF<sub>D</sub>)

창정비 주기 산출시 중요한 변수로 고장간평균시간(MTBF)을 활용하게 된다. 체계개발 신뢰도 분석 시 전자부품에 대해서는 MIL-HDBK-217F를 활용하게 되고 고장정비주기는 무기체계의 고장간 평균시간(MTBF)를 운용수명으로 나눈 값이다. 하지만 주기적 창정비를 수행함으로써 신뢰도 성장이 있음을 고려하여 일반 MTBF와 구별되는 신뢰도 성장에 따른 고장간 평균시간(MTBF<sub>D</sub>)을 적용할 필요가 있다.[4] 즉, 주기적 외주 창정비를 수행하면 비계획 정비에 의해 체계를 운용했을 경우보다 고장간평균시간이 증가하게 되며, 이럴 경우 주기적 외주 창정비 효과에 따라 증가한 창정비 수행 시 고장간평균시간(MTBF<sub>D</sub>)을 고려해야 하는 것이다.

##### (1) 단순 신뢰도 성장

목표 고장간평균시간(MTBF<sub>O</sub>)를 설정한 후 수명주기 기간 중의 고장간평균시간을 단순 산출한다. 즉 창정비 수행 전 비계획 정비에 의해 운용되는 초기 MTBF<sub>i</sub>가 창정비 수행으로 창정비 효과에 따라 MTBF<sub>O</sub>로 향상되고 이를 이용하여 고장간평균시간(MTBF<sub>D</sub>)을 산출한다.



<그림 3> 단순신뢰도 성장

$$MTBF_D = \frac{nMTBF_i + (T_y - n)MTBF_o}{T_y} \quad (1)$$

여기서,

$n$  : 창정비 주기(년)

$MTBF_i$  : 초기 MTBF

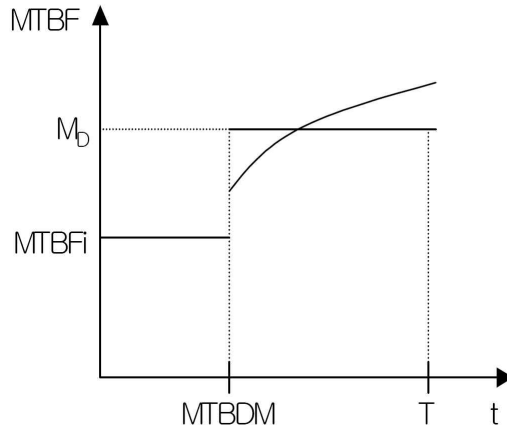
$MTBF_o$  : 목표 MTBF

$T_y$  : 수명(년)

## (2) 신뢰도 성장 모델

신뢰도 성장 모델(DM : Duane Model)<sup>4)</sup>은 본래 개발단계에만 적용할 수 있는 모델이나 주기적 창정비를 통해 얻을 수 있는 고장간평균시간 산출에 적용하기 위하여 다음과 같이 가정하였다. 첫째, 주기적 외주 창정비까지의 시간을 시험시간으로 간주한다. 둘째, 최초 창정비까지의 고장평균시간은 일정하고 이후 신뢰도 성장은 Duane Model 공식에 따라 증가한다. 본 성장 모델이 단순 신뢰도 성장과 다른 점은 창정비 이후 신뢰도 성장률을 기반으로 MTBF가 성장한다는 가정이 포함되어 있다. 이와 같은 가정으로 실장비 운용데이터를 바탕으로 창정비 이후 신뢰도 성장률과 MTBF를 분석하여 목표 고장간평균시간( $MTBF_D$ )을 산출하는 모델을 제시하였다.[4]

4) MIL-HDBK-189 the Military Handbook for "Reliability Growth Management" 참고



<그림 4> Duane 모델 성장

$$M_D = \frac{MTBF_i}{1-\alpha} \left( \frac{T}{MTBDM} \right)^\alpha \quad (2)$$

$$MTBF_D = \frac{MTBF_i MTBDM + M_D (T - MTBDM)}{T} \quad (3)$$

여기서,

$M_D$  : 창정비 이후 MTBF

$\alpha$  : 성장률(Growth Rate, 0.1~0.6)

MTBDM : 창정비간 평균시간 = 연간운용시간 X 창정비주기(년)

### 3.2 창정비 주기 산정 시 HPP 적용의 한계

무기체계 설계단계에서 시스템 신뢰도 예측방법으로 부품수량분석(PCM : Parts Count Method), 부품부하분석(PSA : Parts Stress Analysis)을 적용한다.<sup>5)</sup> 설계단계에서 분석된 PCM, PSA은 HPP(Homogeneous Poisson Process)<sup>6)</sup>을 이용하여 hazard rate가 일정하다. 이러한 모델은 무기체계 최초 가동 이후 가동시간이 경과함에 따라 마멸 및 노화 등의 이유로 인하여 고장들의 발생 시간간격이 점차 짧아지는 시스템의 열화를 표현할 수 없다. 창정비 주기 산정 시에는 이러한 시스템의 열화를 현실적으로 모형화하여 시간의 흐름에 따른 시스템의 성능 저하를 적절히 표현할 수 있는 모형이 고려되어야 한다. 따라서 열화시스템의 모형화에는 수리적 계산이 용이하고 시스템 성능 저하를 표현할 수 있는 NHPP을 적용해야 하고 야전에 배치 이후 운용단계에서는 실 운용환경에 따

5) 종합군수지원 실무지침서(육군본부), 2007

6) HPP(Homogeneous Poisson Process)는 hazard rate이 일정하고 고장간 시간이 독립이고 동일한 지수분포(Independent and Identically Exponential Distribution)인 NHPP의 특수한 경우이다.

라 열화되는 특성을 반영한 열화모형을 적용해야 한다.

이상진[5] 외는 ‘K-1 전차의 고장분포와 부하에 따른 고장률 차이에 대한 연구’에서 무기체계의 고장률 함수 및 창정비 주기 산정에 이론적 근거로 사용되고 있는 육조곡선의 형태가 실제 운용되고 있는 K-1 전차의 고장분포에서 나타나는지를 분석하였다. 여기에서 K-1 전차의 고장률은 대체로 와이블분포를 따르고 있고, 창정비 주기를 설정할 때 육조곡선에서 마모고장이 발생하는 시점이 고려되어야 한다고 주장하고 있다. 이와 같은 연구 결과는 Byeong min mun[7] 외의 “A Superposed Log-Linear Failure Intensity Model for Repairable Artillery Systems”의 NHPP를 통한 정비주기 산출에서도 확인할 수 있다. 또한 서성철[3] 외의 ‘K-9 자주포 엔진 적정 창정비주기 연구’에서 평균 창정비 주기(TBO : Time Between Overhaul)란 내구도 수명을 의미하는 것이 아니고 치명적인 문제를 예방하기 위해 우발 고장단계에서 적용되는 것임에도 불구하고 일반적인 개념으로 내구도 수명 및 창정비주기에 임의 적용하는 것을 문제점으로 지적하였다. 또한 우발 고장단계에 적용되는 고장률이 일정하지 않은 마모고장을 고려해야 한다고 언급하였다. 이와 같이 창정비 주기 산정 시 NHPP 적용의 필요성과 각 무기체계로 적용되는 열화시스템 모델이 상이함을 알 수 있다.

## 4. 열화상태 기반의 창정비 주기 산출 모델

### 4.1 NHPP(Non-Homogeneous Poisson Process) 모델

창정비 주기 산출 시 우발고장만을 고려한 일정한 고장률을 적용하는 것에 대한 문제점은 이상진[5] 외의 “고장분포와 부하에 따른 고장률 차이에 대한 연구”, “경제성 분석을 통한 외주 창정비의 최적주기 결정”, Byeong min mun[7] 외의 “A Superposed Log-Linear Failure Intensity Model for Repairable Artillery Systems” 등에서 제기하였다. 무기체계 고장발생률이 일정하다고 가정하는 HPP로는 무기체계 실제 현상을 반영하지 못한다. 수리가능한 무기체계의 고장발생률의 추세를 모형화하는데 Crow[8]가 제안한 Power Law Process가 많이 사용된다. Power Law Process는 형상 모수(Shape parameter), 척도 모수(Scale parameter)를 통해 고장발생률이 일정하지 않은 단조 추세(Monotonic trend)를 가지는 수리가능 시스템의 개선(Improving) 또는 열화(Degradation)와 같은 고장 패턴을 모형화 할 수 있다.

NHPP에 대하여 작은 시간 구간( $t, t+\Delta t$ )에서의 사건 발생확률은 오직 시간  $t$ 를 의존할 뿐 이전 사건에는 독립이다. 다음을 NHPP의 intensity function이라 정의한다.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(\text{an event} \in (t, t + \Delta t))}{\Delta t}, \quad t > 0 \quad (4)$$

HPP(Homogeneous poisson Process)는 intensity function이 일정하고 고장간 시간이 독립이고 동일한 지수분포(Independent and Identically Exponential Distribution)인 특수한 경우이다. intensity function이 아래와 같은 형태이면 이를 power law process라 한다.

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1}, t > 0 \quad (5)$$

여기서  $t$ 는 시간,  $\alpha$ 는 척도 모수,  $\beta$ 는 형상모수( $\beta < 1$  : 시간이 경과함에 따라 고장발생률 감소,  $\beta = 1$  ; 시간의 경과에 따라 고장발생률 일정,  $\beta > 1$  : 시간이 경과함에 따라 고장발생률 증가)이다.

시스템 고장이 매 쇼크 때마다 발생하지 않고  $k$  번째( $k$ 는 양의 정수) 쇼크에서 발생한다면 intensity function은 다음과 같으며 Modulated Power Law Process라 한다.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(a \text{ shock} \in (t, t + \Delta t))}{\Delta t}, t > 0 \quad (6)$$

만약  $k=3$ 이라면 매번 세 번째 쇼크에서 시스템 고장이 발생한다.

하지만 현실적인 문제에서 수리가능 시스템이 고장발생률이 일정한 단조 추세만을 가지지는 않는다. 많은 고장 모드를 가지는 크고 복잡한 수리가능 시스템에서 단조 추세보다는 다양한 요인의 영향으로 인해 복합 추세(Non-monotonic trend)를 가지는 경우가 더 빈번하며 기존의 Power Law Process로는 복합 추세를 모형화 할 수 없다. “K-1전차의 고장분포와 부하에 따른 고장률 차이에 대한 연구”에서 제시한 바와 같이 고장발생률은 육조곡선의 형태를 갖는다. 이에 대해 Pulcini[12]는 복합 추세를 모형화 하기 위하여 Superposed Power Law Process Model(Superposed PLP Model)을 제안하였다. Superposed PLP Model은 수리가능 시스템에서 고장발생률이 감소하다가 증가하는 복합 추세를 모형화 할 수 있음을 기존문헌을 통해 파악할 수 있다. 하지만 Superposed PLP Model은 고장발생률이 육조곡선형태 또는 증가하다가 감소하는 복합 추세를 모형화하는데 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 보완하여 Byeong min mun[7] 외는 “A Superposed Log-Linear Failure Intensity Model for Repairable Artillery Systems”에서 고장발생률이 육조곡선형태를 모형화 하였다.

$$\lambda(t) = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left( \frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1-1} + \frac{\beta_2}{\alpha_2} \left( \frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2-1}, \alpha_j, \beta_j > 0, j=1,2. \quad (7)$$

## 4.2 Bayes Estimation

### 1) 베이즈 정리(Bayes' theorem)

확실히 알려지지 않은 인식론적 불확실성에서의 확률 파라미터를 추정하는 데에 베이저안 접근법을 이용할 수 있다. 베이저안 접근법은 확률변수  $X$  에 대해 조건부 확률을 이용하는 다음과 같은 베이즈 정리를 기본이론으로 한다.

$$p(\theta|X) \propto p(X|\theta)p(\theta) \quad (8)$$

여기서  $\theta$ 는 추정하고자 하는 확률 파라미터( $X$ 가 정규분포를 한다면,  $\theta$ 는 모집단의 평균  $\mu$ 와 모집단의 표준편차  $\sigma$ 이다),  $x$ 는 유한개의 측정된 샘플데이터(sample),  $p(X|\theta)$ 는  $\theta$ 하에서 측정된 샘플데이터의 우도(likelihood),  $p(\theta)$ 는  $\theta$ 의 사전확률밀도함수(prior Probability Density Function, prior PDF),  $p(\theta|X)$ 는 측정된 샘플데이터  $x$ 하에서 업데이트 되는 사후확률밀도함수(posterior PDF)이다. 새로운 샘플데이터가 추가되면 사후분포  $p(\theta|X)$ 는 다시 사전분포  $p(\theta)$ 로 활용가능하며, 이러한 과정이 반복되면서  $\theta$ 에 대한 신뢰도를 점점 더 향상 시키게 되는데 이를 베이지안 학습효과라 한다.

## 2) MPLP case

$t_1 < t_2 < \dots < t_n$ 에서 관측중단된 MPLP의  $n$ 개의 고장에 대하여  $t_{i-1}$ 이후  $t_i$ 의 조건부 PDF는 식 (9)과 같다.

$$f(t_i|t_{i-1}) = \frac{1}{\Gamma(k)} \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t_i}{\theta}\right)^{\beta-1} \left[ \left(\frac{t_i}{\theta}\right)^\beta - \left(\frac{t_{i-1}}{\theta}\right)^\beta \right]^{k-1} \exp \left[ -\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^\beta + \left(\frac{t_{i-1}}{\theta}\right)^\beta \right] \quad (9)$$

이로부터 우도함수는 다음과 같다.

$$L(\beta, \theta, k | t_1, t_2, \dots, t_n) = \frac{1}{(\Gamma(k))^n} \frac{\beta^n}{\theta^{n\beta k}} \exp \left[ -\left(\frac{t_n}{\theta}\right)^\beta \right] \prod_{t=1}^n t_i^{\beta-1} \prod_{t=1}^n (t_i^\beta - t_{i-1}^{\beta-1})^{k-1} \quad (10)$$

Myung Hwan Na[11]의 논거와 각 모수는 독립이라는 가정 하에 사전 분포를 Jeffrey's prior를 적용하였다.

$$\pi(\beta) = \frac{1}{\beta} \quad (11)$$

$$\pi(\theta) = \frac{1}{\theta} \quad (12)$$

$$\pi(k) = \sqrt{\psi'(k)} \quad (13)$$

여기서,

$\psi'(k) = d^2 \ln \Gamma(k) / dk^2$  : tri-gamma function

사전분포가 독립이라면, non-informative joint prior는 다음과 같다.

$$\pi(\beta, \theta, k) = \frac{\sqrt{\psi'(k)}}{\beta\theta} \quad (14)$$

joint posterior 확률밀도함수(PDF; Probability Density Function)는 다음과 같다.

$$\pi(\beta, \theta, k | t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{C} \frac{\sqrt{\psi'(k)}}{(\Gamma(k))^n} \frac{\beta^{n-1}}{\theta^{n\beta k+1}} \exp\left[-\left(\frac{t_n}{\theta}\right)^\beta\right] \prod_{t=1}^n t_i^{\beta-1} \prod_{t=1}^n (t_i^\beta - t_{i-1}^\beta)^{k-1} \quad (15)$$

여기서,

$$C = \int_0^\infty \int_0^\infty g(0,0) dk d\beta, \quad (16)$$

$$g(a,b) = k^a \frac{\beta^{n-2+b}}{t_n^{n\beta k}} \frac{\sqrt{\psi'(k)^n} \Gamma(nk)}{(\Gamma(k))^n} \prod_{t=1}^n t_i^{\beta-1} \prod_{t=1}^n (t_i^\beta - t_{i-1}^\beta)^{k-1} \quad (17)$$

따라서  $\beta, \theta, k$ 에 대한 각각의 사후 분포는 다음과 같다.

$$\pi(\beta | t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{C} \int_0^\infty g(0,0) dk, \quad (18)$$

$$\pi(\theta | t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{C} \frac{1}{\theta} \int_0^\infty \beta^{n-1} \prod_{t=1}^n t_i^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t_n}{\theta}\right)^\beta\right] \int_0^\infty \frac{\sqrt{\psi'(k)}}{(\Gamma(k))^n} \frac{1}{\theta^{n\beta k}} \prod_{t=1}^n (t_i^\beta - t_{i-1}^\beta)^{k-1} dk d\beta \quad (19)$$

$$\pi(k | t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{C} \int_0^\infty g(0,0) d\beta, \quad (20)$$

각 변수에 대한 사후 분포를 구하고 이를 이용하여 MTBF( $t_n$ )의 베이지안 추정량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\widehat{MTBF}_B(t_n) = \frac{\hat{\theta}}{\Gamma(\hat{k})} \int_0^\infty y^{k-1} \left[ y + \left(\frac{t_n}{\hat{\theta}}\right)^\beta \right]^{\frac{1}{\hat{\beta}}} \exp(-y) dt - t_n \quad (21)$$

여기서,

$\hat{\beta}, \hat{\theta}, \hat{k}$ 은 각각  $\beta, \theta, k$ 의 베이지안 추정량이며 만약  $k=1$  이면 PLP의 MTBF 추정량이 된다.

### 4.3 열화모델

대부분의 무기체계는 최초 가동 이후 가동시간이 경과함에 따라 고장들의 발생간격이 확률적으로 짧아지는 열화(deterioration)를 겪게 된다. 이러한 열화과정을 수리적 모델로 표현한 열화모델은 열화신호(고장발생률)의 함수형태가 열화과정 동안 발생하는 물리적 현상과의 상관관계를 모델링한 것이다. 함수 형태는 연속 시간, 연속 상태 추계 모델로서 모델링될 수 있다. 일반적으로  $t_j$  시간에서  $i$ 번째 고장발생 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[10]

$$S(t_{ij}) = \eta(t_{ij}; \Phi_{im}, \Xi_{ik}, B_{il}) + \epsilon(t_{ij}) \quad (22)$$

여기서,

$\eta(\cdot)$  : 열화를 나타내는 함수

$\Phi_{im}$  : 모집단의 열화특성을 나타내는 parameter의 vector

$\Xi_{ik} = (\theta_{i1}, \dots, \theta_{ik})$  : Unit간의 변동을 설명하는 k stochastic parameter의 vector

$B_{il} = (\beta_{i1}, \dots, \beta_{il})$  : 외부요인을 차지하는 1개의 (고정 또는 추계적)

공분량 (covariates) vector

$\epsilon(t_{ij})$  : 오차항

과거의 신뢰성, 고장 데이터 및 상태기반 열화 측정 자료는 1) 고정 공분량 및 결정적 모형(Deterministic model) 모수 값과 2) 추계적 모델 모수와 추계적 공분량의 사전 분포를 예측하는데 사용할 수 있다. 이 모델을 통하여 잔존수명(RLD : Residual Life Distribution)을 계산할 수 있다. 잔존수명의 계산은 사전 정의된 고장 한계선  $\eta^*$ 에 도달하는 열화신호(고장발생률)의 크기에 도달하는 데 필요한 시간을 계산하는 것과 같다.

$$P\{T \leq t | \Phi_{im}, \Xi_{ik}, B_{il}\} = P\{\eta(t_{ij}; \Phi_{im}, \Xi_{ik}, B_{il}) + \epsilon(t_{ij}) \geq \eta^* | \Phi_{im}, \Xi_{ik}, B_{il}\} \quad (23)$$

장비의 고유한 열화신호를 수집해서 무기체계의 독특한 열화특성에 맞는 확률변수와 확률변수의 사전분포를 선정할 수 있다. 이렇게 선정된 확률변수를 이용하여 열화모델을 수립할 수 있다.

MPLP의 경우,  $T_1 < T_2 < \dots < T_n$  (관측 중단된 MPLP의 n개의 고장시간)에 대하여 조건부 신뢰도 함수( $T_{i-1}$ 을 알 때  $T_i$ 에서의 신뢰도)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(t_i | t_{i-1}) &= \Pr(T_i > t | T_{i-1} = t_{i-1}) \\ &= \Pr(\text{no failure} \in [t_{i-1}, t]) \end{aligned} \quad (24)$$

$$= \Pr(N(t) - N(t_{i-1}) \leq k-1)$$

$$= \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(U(t) - U(t_{i-1}))^j}{j!} \exp[-U(t) + U(t_{i-1})],$$

여기서  $U(t) = \int_0^t \lambda(u)du$ 는 NHPP의 평균 값 함수이다.

열화신호의 예측된 분포를 활용하여 열화신호가 사전 정의된 고장수준 D에 도달할 때까지의 시간분포를 모니터링 함으로써 잔존수명을 계산할 수 있다. T는 잔존수명의 random variable이며 T가  $L(t_k + t) = D$ 을 만족한다. 이때의 분포는 아래와 같다.

$$F_T(t) = P(T \leq t | L_1, \dots, L_k) \quad (25)$$

상기 분포를 활용하여 누적 분포( $F_T$ )가 90%인 경우는 T 시점에 장비 수명의 90%가 지나고 있다고 할 수 있다.

#### 4.4 열화모델을 활용한 창정비주기 산출 모델

모니터 되는 무기체계의 열화신호 변화를 특징짓는 열화모델을 정의하고 배치 후 운용되는 무기체계의 고장정보로부터 고장품목, 고장발생 시간 등의 열화신호 data을 추출하여 열화신호 database를 구축한다. 구축된 database로 부터 초기 RLD와  $F_T(t)$ 을 추정한다. 초기 RLD는 예비 창정비일정 개발에 사용하며, RLD 값은 평균을 구할 수 없어서 중앙값( $Q_{0.5}[RLD]$ )을 사용한다. 초기 창정비 일정은  $Q_{0.5}[RLD]$ 을 기반으로 평가하고 조정한다. 열화모델을 활용한 창정비주기 산출 모델은 연속적으로 잔존수명을 최신화하여 창정비 일정을 실시간으로 업데이트한다. 이러한 최신화 과정은 다음과 같은 정지 규칙을 만족할 때 까지 지속한다. 정지 규칙이란 계속적으로 잔존수명과 정비 일정을 최신화하는 것과 데이터 수집을 중단하고 최종 창정비 일정에 따라 정비를 수행할 것인지를 의사 결정하는 규칙이다. 데이터를 수집할수록 잔존수명에 대한 예측은 정확하게 되지만 최적의 창정비시기를 지나칠 수 있으므로 정비 규칙을 만족할 때 장비 운용 및 데이터 수집을 중지하고 최종 창정비 일정에 따라 정비를 수행해야 한다.

정지 규칙은 다음과 같은 식을 활용하며 순간신뢰도(Instantaneous Reliability)가 목표신뢰도(Desired Reliability) R을 만족할 때까지 데이터 수집을 수행한다.[10]

$$\min_{0 < t_k < \infty} \{1 - [F_T(t_{k+\delta}) - F_T(t_k)]\} \geq R \quad (26)$$

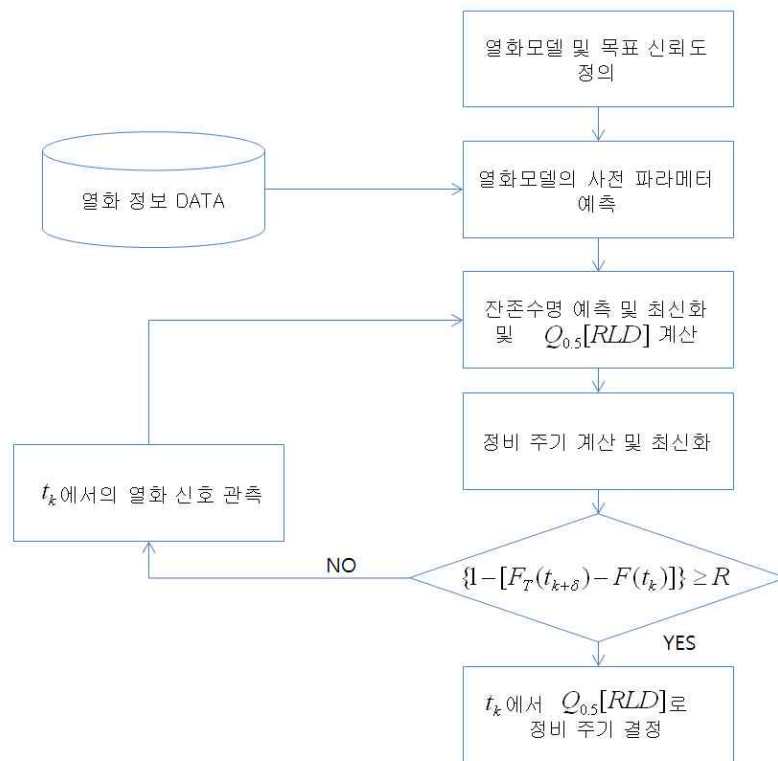
여기서,

$F_T(t_{k+\delta})$  :  $t_k$ 에서 최신화된 잔존수명의 CDF

$t_k$  : 가장 최신의 열화신호가 관측된 시간

$\delta$  : 미래의 작은 시간 증분

정지 규칙을 만족하게 되면 최후에 관측된  $t_k$  시점에서  $Q_{0.5}[RLD]$ 로 창정비 주기를 결정한다. 다음은 열화모델을 활용한 창정비주기 산출 모델의 프로세스를 그림 5로 제시하였다.



<그림 5> 창정비주기 산출 모델의 프로세스

## 5. 결론

현재 국방부는 수명주기 관점에서 획득과 운영유지를 통합 관리하기 위하여 총수명주기체계관리 도입을 추진하고 있다. 상태기반의 창정비 주기 산출은 군의 운용유지비용, 그 중에서도 많은 비용이 소요되는 창정비 비용을 절감하고, 장비를 잔존수명까지 최대한 사용함으로써 총수명주기비용을 절감할 수 있다.

상태기반정비는 무기체계 특정부위에 센서 또는 휴대형 상태진단장비 등을 이용하여 실시간으로 측정/수집된 데이터를 기반으로 무기체계의 정상작동 여부를 파악하고 필요시에 정비를 행하는 신개념의 정비형태이다.

본 연구에서는 기존 창정비 주기 산정 시 적용된 방법과 정비전략의 변화로 대두되고 있는 상태기반정비를 적용한 창정비 주기 산출 방법을 제시하였다. 열화 상태에 따른 창정비 주기를 산출하기 위하여 고장정보를 활용한 NHPP의 열화모델을 수립하고 베이지안 방법으로 열화모델의 사전분포 파라미터를 예측한다. 계속적으로 수집되는 고장정보를 활용하여 잔존수명을 최신화하고 창정비 주기를 산출하는 프로세스를 제시하였다. 본 연구에서 제시하는 열화모델을 활용한 창정비 주기 산출 모델을 적용한다면 창정비 도래시점까지 군 전력의 공백 없이 잔존수명까지 최대사용으로 장비유지비용 절감 및 장비가용도 향상의 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 창정비 주기 산정에 대한 이론적 모델과 프로세스만을 제시하였다. 실 무기체계에 적용하기 위해서는 해당 무기체계의 고장이력 데이터를 획득하고 열화모델을 검증하는 추후 연구가 필요할 것이다.

## 참고문헌

- [1] 김택상, 안선응, “열화시스템의 수리를 위한 베이지안 의사결정 모형의 개발”, 『한국 산업경영시스템학회 춘계학술대회 논문집』, 2005, pp138~147
- [2] 문병민, 배석주, “복합 추세를 가지는 수리가능 시스템의 고장 데이터 모형화에 관한 연구”, 『신뢰성응용연구』, Vol 9. No. 1, 2009, pp.121~130.
- [3] 서성철, 김태균, 송방원, “K-9 자주포 엔진 적정 창정비주기 연구”, 『한국국방경영 분석학회지』, Vol. 31, No. 2, 2005, p.10.
- [4] 이상엽, “경제성 분석을 통한 외주 창정비의 최적주기 결정” 『한양대학교』, 2004,
- [5] 이상진, 최석윤, “K-1전차의 고장분포와 부하에 따른 고장률 차이에 대한 연구”, 『한국국방경영분석학회지』, Vol. 35, No. 2, 2009, pp.47~48.
- [6] 조광익, 신용준, Abdel E. Bayoumi, “군 헬기의 상태기반 정비를 위한 시간 - 주파수 영역 정보추정 기법의 적용”, 『전기의 세계』, Vol. 58, No. 8, 2009, p.65.
- [7] Byeong Min Mun, Suk Joo Bae and Paul H. Kvam "A Superposed Log-Linear Failure Intensity Model for Repairable Artillery Systems", Journal of Quality Technology, 2012,
- [8] Crow, L., "Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems", Reliability and Biometry,(Eds., F. Proschan and R.J.Serfling) SIAM, 1974, pp.379~410.
- [9] Jay Lee, Jun Ni, Dragan Djurdjanovic, Hai Qiu, Haitao Liao, "Intelligent prognostics tools and e-maintenance", Computers in Industry 57, 2006, pp. 476~489.
- [10] Kevin A. Kaiser and Nagi Z. Gebraeel, "Predictive maintenance management using sensor-based degradation models" IEEE Transaction On Systems, Man, And Cybernetics – Art A: Systems and Humans, Vol. 39, NO. 4, 2009, pp.842~844.
- [11] Myung Hwan Na, Moon Ju Kim, Lin Ma, "Bayesian approach to mean time between failure using the modulated power law process", 『KSIAM IT series』 Vol. 10. No. 2, 2006, pp.41~48.
- [12] Pulcini G. "Modeling the failure data of a repairable equipment with bathtub type failure intensity". Reliability Engineering and System Safety, Vol. 71, No. 2, 2001, pp.209~218.