

운용환경을 고려한 항공오일시험장비의 최적정비주기 설정

김인석 · 정 원[†]

대구대학교 산업경영공학과

Optimal Maintenance Cycle for Aviation Oil Testing Equipment under the Consideration of Operational Environment

In Seok Kim · Won Jung[†]

Department of Industrial and Management Engineering Daegu University

Purpose: Military maintenance involves corrective and preventive actions carried out to keep a system in or restore it to a predetermined condition. This research develops an optimal maintenance cycle for aviation oil testing equipment with acceptable reliability level and minimum maintenance cost.

Methods: The optimal maintenance policy in this research aims to satisfy the desired reliability level at the lowest cost. We assume that the failure process of equipment follows the power law non-homogeneous Poisson process model and the maintenance system is a minimal repair policy. Estimation and other statistical procedures (trend test and goodness of fit test) are given for this model.

Results: With time varying failure rate, we developed reliability-based maintenance cost optimization model. This model will reduce the ownership cost through adopting a proactive reliability focused maintenance system.

Conclusion: Based on the analysis, it is recommended to increase the current maintenance cycle by three times which is 0.5 year to 1.5 years. Because of the system's built-in self-checking features, it is not expected to have any problems of preventative maintenance cycle.

Keywords: Reliability, NHPP, Power Law Model, Maintenance Interval, MLE

1. 서론

무기체계는 적절한 비용으로 신뢰성 있고 유지보수 하기가 좋아야 하며, 임무수행능력이 사용자의 필요를

충족시킬 수 있어야 한다. 특히, 비용은 무기체계에 있어서 신뢰성과 함께 KSA(Key System Attribute)로 관리 되고 있고 가용도와 관련한 지속가능성해법의 균형을 제공하며 획득체계의 의사결정을 하는데 있어 핵심역

[†] 교신저자 wjung2020@gmail.com

2016년 8월 22일 접수, 2016년 9월 17일 수정본 접수, 2016년 9월 20일 게재 확정.

할을 한다[1]. 무기체계의 유지비용은 수명주기 동안의 전체비용 중에서 60% 이상을 차지할 정도로 비중이 높기 때문에 신뢰도 분석과 최적 정비주기 설정을 포함한 정비정책을 결정하는데 있어, 비용을 고려하는 일은 매우 중요하다[2]. 지금까지 개발된 최적 유지보수 또는 정비주기 결정 모델은 주로 사용시간 기준 예방정비(TBM: Time Based Maintenance), 고장수 기준 예방정비(FNBM: Failure Number Based Maintenance), 또는 사용시간 및 고장수 통합기준 예방정비(IMT & FN: Integrated Maintenance of Time and Failure Number)로 분류된다. 그러나 가장 중요한 결정요소는 정비정책으로서 정비정책에 따라 해당 시스템의 수명주기 비용이 결정되며 대부분의 경우 시스템의 최적 정비주기 정책 결정은 비용을 최우선으로 고려하고 있다[3].

본 연구에서는 첨단 항공오일시험장비에 대하여 Power Law 모델을 적용한 신뢰도 추정과 검정 및 정비비용이 최소가 되는 최적 정비주기 설정에 대하여 연구하였다. 시험장비는 운용 중 고장이 발생하면 고장부품을 교체하거나 수리하여 고장 이전의 상태로 되돌릴 수 있는 수리가능 시스템으로 본 시험장비는 고장률이 시간에 따라 변하는 비동질적 포아송과정(NHPP: Non-Homogeneous Poisson Process)을 따르는 특성을 가지고 있다.

항공오일시험장비는 각종 항공기의 엔진 오일로부터 샘플을 채취하여 분석함으로써 항공기 손상을 감지하고, 고장발생 전에 조치를 취하는 무기체계의 예방정비(PM: Preventive Maintenance)에 효과적인 장비이다. 따라서 항공오일분석은 공군에서 규칙적인 표준정비활동이 되었으며, 항공기엔진제작사들도 예방정비프로그램의 일환으로 정기적인 샘플링을 적극 추천하고 있다. 한편, 항공오일 제작사들도 오일의 비정상적 특성을 발견하기 위한 방법으로 오일분석을 채택하고 있다. 효율적인 오일분석프로그램은 실제 사고가 일어나기 전에 내부부품의 고장직전 현상을 대부분 발견할 수 있으며, 오일에 포함된 오염물을 통하여 부품이 미성숙 마모로 이어지는 초기단계의 징후를 발견할 수 있다.

2. 항공오일시험장비의 운용환경

2.1 정비정책

통상적으로 시스템은 수리가능 시스템과 수리불가

능시스템으로 구분되며, 수리가능시스템의 경우 수리를 통해 고장난 시스템이 새것 수준과 같은 상태(as good as new)로 되는 것을 완전수리(perfect repair)라 한다. 그러나 현장에서는 고장 난 부품만을 수리하거나 교체하여 시스템이 고장직전 상태(as bad as old)로 복구되는 최소수리(minimal repair)가 많이 이루어지고 있다. 그리고 이 두 가지 정비정책의 중간적인 형태인 불완전 수리(imperfect repair)로 구분할 수 있다 [4, 5]. 항공오일시험장비는 고장이 발생하면 최소수리만을 시행하고 특정한 주기에만 예방정비를 시행하는 정비정책을 사용하고 있다.

항공오일시험장비의 운용부대는 계획정비를 통하여 대부분의 정비를 수행하지만 특별한 경우에 있어서는 일일정비의 형태로 비계획 정비를 수행하고 있다. 또한, 정비부대의 이동정비는 일반적으로 정비계획에 따라 실시되지만, 운용부대의 요청에 따라 실시되기도 한다. 이외 업체 정비는 보증수리 또는 기술지원 등의 형태로 수행된다. 통상적으로 계획정비를 예방정비로 분류하고, 비계획 정비를 고장정비로 분류하기도 하지만 두 가지 분류기준은 확실하지 않은 경우도 있다. 고장정비 및 예방정비의 구분은 고장 발생으로 정비를 수행하는지 여부이며, 계획정비 및 비계획정비는 정비활동을 일정한 계획에 의해 수행하는지 여부이다. 따라서 계획정비 기간 내에도 고장정비가 발생할 수 있으며, 비계획정비 중에도 예방정비의 하나인 주기성 품목의 교환이 이루어지기도 한다. 현재 군에서 적용하고 있는 예방정비 주기는 기술교범에 명시된 6개월을 적용하고 있다[6].

2.2 운용환경

본 연구의 대상이 되는 항공오일시험장비는 분석업무 수행 시 필요한 몇 가지 주요 기능을 갖는 서브시스템으로 구성되어 있다. <Fig. 1>의 기능 블록도는 시스템의 개략적인 구성을 보여준다[6].

항공오일시험장비에 의한 표준분석은 다음의 4가지를 포함한다[7]. 첫 번째, 스펙트럼 시험은 엔진오일 샘플의 일부를 취하여 스펙트로미터에 넣는다. 이 시험에서는 여러 가지 금속성분과 첨가물의 함량을 분석한다. 두 번째, 불용물질 시험은 오일 속에 포함되어 있는 연마재 입자를 측정한다. 입자는 오일의 산화에 의해 형성되며, 오일이 소실되는 것은 산소 때문

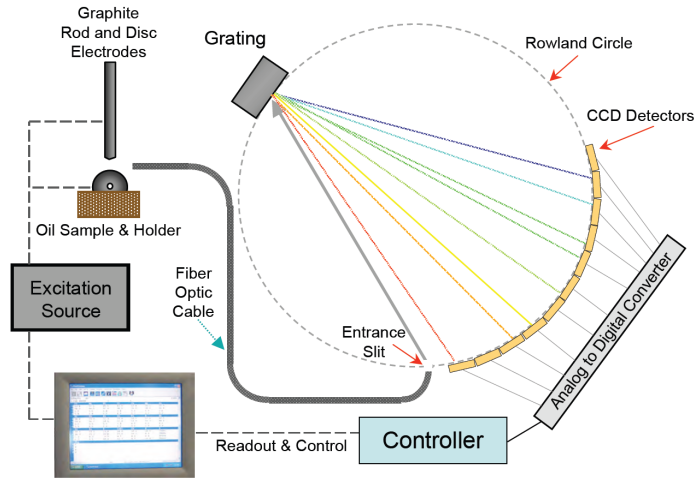


Fig. 1 Functional block diagram

이며 열로 인해 가속된다. 이 시험에서는 오일 필터의 성능과 오일의 산화정도를 알 수 있다 세 번째, 점도 시험은 오일의 등급과 두께를 측정한다. 만약 점도가 정해진 범위를 벗어나면, 오일은 과열되었거나, 연료나 습기 또는 냉각수로 인해 오염되었을 가능성이 크다. 네 번째, 인화점 시험은 오일기스가 점화되는 온도를 시험한다. 특정 오일의 등급에 따라 오일이 점화되는 온도를 알고 있다. 만약 오일이 정해진 온도 이하에서 점화되면 오일은 오염된 것이라고 할 수 있다 엔진오일의 가장 일반적인 오염원은 연료이다

시험장비의 오일분석을 통하여 여러 가지 고장 형태를 초기단계에 발견할 수 있으며, 고장이 진행되는 후속단계에서는 필터분석이나 관찰을 통하여 문제를 발견할 수 있다. 모든 엔진은 마모가 발생하며, 궁극적으로는 마모고장을 일으키게 된다. 엔진오일을 사용하는 기간 동안에는 특별한 변수가 없다고 해도 예상되는 평균적인 마모는 일어난다고 할 수 있다 만약 기계적인 문제가 진전되면 마모는 평균적인 수준에서 나쁜 수준으로 또 비정상적인 수준으로 발전하게 된다. 고장의 진전은 계속되는 오일 재충전 과정에서 반드시 일어나게 되어 있으며, 예상보다 더 빨리 진행될 수도 있다. 만약 마모가 비정상적인 단계로 진행되는 경우에는 손상을 입은 커다란 입자가 엔진에서 분리되어 오일 필터나 스크린에 쌓이게 된다. 기계부품은 제조과정에서 이미 내부 결점을 포함하고 있어 체계의 신뢰성에 영향을 미칠 수도 있다 부품 사용기간이 경과함에 따라 열 사이클과 운용 과정을 통하여 부

품이 약화되고, 결국에는 돌발적인 고장이 발생하게 된다. 문제가 진전됨에 따라 굴곡이 생기고 오일에 마모금속이 증가하게 된다[8].

분석에 사용된 자료는 정확한 발생시점과 원인 그리고 고장발생 결과의 신뢰성을 보장하기 위해 장비 정비정보체계에서 관리되고 있는 2012년부터 2015년까지의 정비이력 자료를 사용하였으며, 사용 중 발생하는 고장과 정비작업에 의한 정비 실적에 기초한 데이터로 육·해·공군에서 운용중인 OO대를 선정하여 분석하였다.

최근 정비간 장비운용을 중단시킨 단위부품(LRU: Line Replace Unit)을 분석해 보면 <Table 1>과 같다.

Table 1 Failure statistics for LRU (2012~2015)

LRU	Number of failures	Percentage of failure(%)
High voltage transformer	25	37.3
Power supply	12	17.9
Main power/door switch	9	13.4
Electrode shaft mounting	7	10.4
Sample table assembly	5	7.5
PM tube	3	4.5
Operating system program	2	3.0
Others	4	6.0
Total	67	100

3. 신뢰도 평가

신뢰도 평가는 신뢰도 성장분석 방법을 사용하였다. 신뢰도 성장분석은 대부분 개발단계에서 개발 성숙도를 평가하는 방법으로 사용되지만, 운용단계에서도 장비 사용 숙련도 향상, 형상변경 등의 개선활동, 장비 노화 등을 확인하기 위해서도 사용이 가능하다. 개발단계에서는 Crow-AMSAA, Daune 모델 등을 활용하며, 운용단계에서는 Power Law 모델을 활용하는 경우가 많다[9].

3.1 강도함수(Intensity function)

분석에 사용된 자료는 장비정비정보체계에서 관리되고 있는 2012년부터 2015년까지의 정비 실적에 기초한 데이터로 육·해·공군에서 운용중인 OO대를 선정하여 분석한 결과는 <Fig. 2>와 같다.

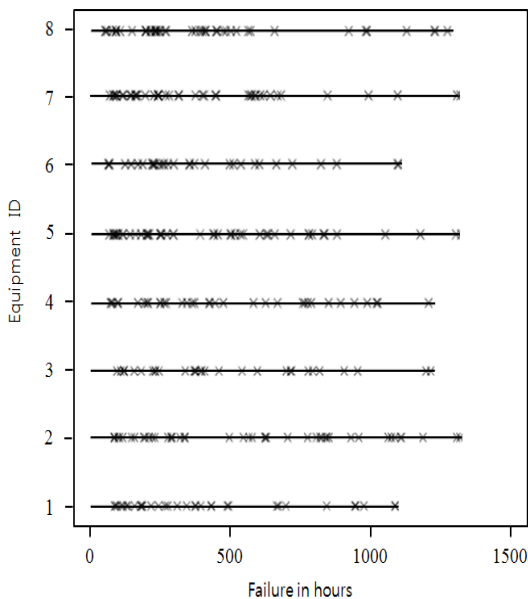


Fig. 2 System failure event plot

분석 결과를 보면 수리가능 시스템인 항공오일시험장비의 강도함수가 시간에 따라 변하는 비동질적 포아송과정을 따르며, 고장간격시간이 시간이 지남에 따라 감소하는 단조추세 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 NHPP Power Law 모델을 활용하여 식 (1)과 같이 강도함수(intensity function)를 구할 수

있다[9-12].

$$r(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}, \lambda > 0, \beta > 0, t > 0 \quad (1)$$

여기서 λ 는 척도모수이며, β 는 형상모수이다. 만약 $\beta < 1$ 이면 초기에 제조결함 등에 의해 고장이 발생하다가 감소하는 것을 나타내며, $\beta > 1$ 이면 시간이 경과함에 따라 신뢰도가 악화됨을 나타낸다. 수리가능 시스템에서 $\beta > 1$ 인 경우 수명주기비용(life cycle cost) 문제와 관련하여 최적 정비주기 설정 등의 연구를 많이 시행하고 있다.

3.2 통계적 방법에 의한 추정

비동질적 포아송과정을 이용하여 신뢰도 성장을 모델화한 경우에는 최우추정법(MLE: Maximum Likelihood Estimates)에 의하여 λ (척도모수)와 β (형상모수)의 점 추정치를 구할 수 있다[9, 12, 13].

최우추정법에 의하여 형상모수와 척도모수의 점 추정치를 구하면 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{q=1}^k N_q}{kT^{\hat{\beta}}} = 0.000265 \quad (2)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{q=1}^k N_q}{\sum_{q=1}^k \sum_{i=1}^{N_q} \ln\left(\frac{T}{X_{iq}}\right)} = 1.29 \quad (3)$$

여기서 N_q 는 q 번째 시스템에 대한 고장 수, k 는 관측된 장비 수, T 는 관측 중단 시간, X_{iq} 는 q 번째 시스템에 대한 고장발생시간 간격을 나타낸다.

모수추정결과, 강도함수에 대한 추정치는 식 (4)와 같다.

$$\hat{r}(t) = 2.65 \times 10^{-4} \times 1.29 \times t^{0.29} \quad (4)$$

3.3 적합도 검정(Goodness-of-Fit Test)

식 (1)의 형태를 갖는 NHPP 강도함수가 Power Law 모델을 잘 나타낸다는 귀무가설을 Cramer-von Mises 통계량을 이용하여 검정하였다[9, 11, 12, 13].

형상모수에 대한 통계량을 계산하기 위하여 불편 추정량은 식 (5)와 같다.

$$\bar{\beta} = \frac{M-1}{M} \hat{\beta} \quad (5)$$

적합도 검정 통계량은 식(6)과 같다.

$$C_M^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{X_{iq}}{T_q} \right)^{\bar{\beta}} - \frac{2i-1}{2M} \right]^2 = 0.159 \quad (6)$$

여기서 M 은 관측된 총 수, T_q 는 전체 관측시간, X_{iq} 는 각 시스템의 고장 발생시간이다 만약 통계량 C_M^2 이 정의된 유의수준에 대한 임계값을 초과하면 귀무가설은 기각된다. 각 유의수준에 대한 C_M^2 의 임계값은 <Table 2>와 같으며, 각각의 M 에 따른 값들이 수록되어 있다[9, 12, 13].

Table 2 Goodness of fit test(Cramer-von Mises) threshold value

significance level(α) M	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
15	0.126	0.144	0.169	0.215	0.33
16	0.127	0.145	0.171	0.216	0.33
17	0.127	0.145	0.171	0.217	0.33
18	0.127	0.146	0.171	0.217	0.33
19	0.127	0.146	0.171	0.217	0.33
20	0.128	0.146	0.172	0.217	0.33
30	0.128	0.146	0.172	0.218	0.33
60	0.128	0.147	0.173	0.220	0.33
100	0.129	0.147	0.173	0.220	0.34

여기서 유의수준 $\alpha = 0.05$, $M = 67$ 에서 임계값은 0.220이고, 항공오일시험장비의 $C_M^2 = 0.159$ 이다. 따라서 C_M^2 가 0.220보다 작기 때문에 귀무가설을 기각할 수 없으므로, Power Law 모델이 항공오일시험장비의 자료와 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 즉 표본에 대한 강도함수 $\hat{r}(t)$ 를 모집단의 강도함수 $r(t)$ 로 사용할 수 있다.

4. 최적 정비주기 산출

현재 오일분석시험장비의 정비주기 산출은 정비 이후 경과 시간에 따른 신뢰도 변화를 최우추정법 중 이항방법(binomial method)을 적용하여 관측신뢰도를 측정하여 정비주기를 산출하고 있다[14, 15]. 분포함수는 지수분포로 가정하여 고장률 만을 고려하여 산출하고 있으며, 신뢰도는 식(7)과 같다.

$$R(T) = e^{-kT} \quad (7)$$

여기서 k 는 out of tolerance rate 또는 고장률, T 는 시간을 의미하며, 식 (7)을 활용한 변경 정비주기(T_r) 산출 수식은 식(8)과 같다.

$$T_r = T_c \times \frac{\ln r}{\ln R^*} \quad (8)$$

$$= T_c \times \frac{\ln(0.85)}{\ln\left(\frac{\text{고장미발생장비수량}}{\text{전체완료장비수량}}\right)}$$

여기서 T_r 는 변경 정비주기, T_c 는 현재 정비주기, r 는 목표 신뢰도(85%), R^* 는 관측 신뢰도를 나타내며, 정비주기는 6개월을 적용하고 있다. 그러나 항공오일 시험장비의 야전운용자료를 분석한 결과 강도함수는 NHPP Power Law 모델이 적합함에 따라 식 (8)을 적용하는 것에는 한계가 있다. 현재의 운용환경 및 운용 목적의 중요성을 고려할 때 좀 더 효율적인 정비정책을 세워야 할 필요성이 있다.

NHPP 모델에서의 정비는 단지 시스템의 작동을 재가동시키는 기능만을 수행하게 되며, 정비 이후의 강도함수가 정비 직전의 강도함수와 같아지는 경우 최소수리(minimal repair)라고 부른다[5]. 따라서 최소수리 정책에서의 최적 정비주기에 따른 효율적 비용함수는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다[3, 5].

$$C(T) = \frac{C_{pm}R(T) + C_{cm}[1 - R(T)]}{T \times R(T) + \int_0^T tf(t)dt} \quad (9)$$

여기서 $C(T)$ 는 정비주기간 발생비용, C_{pm} 는 예방 정비 비용, C_{cm} 는 고장정비 비용, $R(T)$ 는 신뢰도, T

는 정비주기를 나타낸다. 식 (9)를 최소로 하는 T^* 를 계산하면, 비용 기준의 최적 정비주기를 산출할 수 있게 된다.

시뮬레이션을 위해 비용 산출은 군에서 산출하고 있는 2012년부터 2015년까지의 정비 원가계산 자료를 활용하였으며, 예방정비비용은 계획 정비 시 소요된 비용을 산출하였고, 고장정비비용은 비계획 정비 시 소요된 비용을 산출하여 계산하였다. 비용은 직접재료비, 직접노무비, 직접경비, 제조간접비 및 일반관리비 금액으로 구성되어 있다. 시뮬레이션 입력변수는 <Table 3>과 같다.

Table 3 Simulation input parameters

Parameters	Input value
PM Cost (Cpm)	00,000,000 won
CM Cost (Ccm)	00,000,000 won
Simulation time interval	0.1 year

식 (9)와 <Table 3>을 이용하여 비용이 최소인 최적 정비주기를 산출한 결과는 <Fig. 3>과 같다.

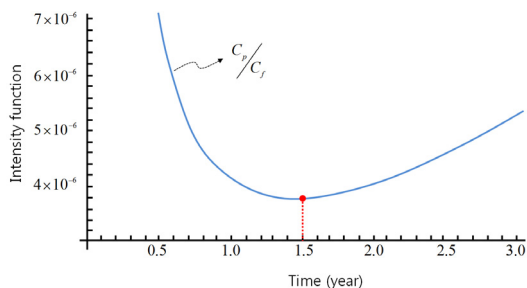


Fig. 3 Cost–efficiency curve of minimum cost and maintenance interval

<Fig. 3>에서 연구의 대상이 되는 항공오일시험장비의 유지비용과 신뢰도가 최소값을 갖는 최적 정비 주기는 1.5년(18개월)으로 분석되었으며, 현재의 정비주기인 0.5년(6개월) 보다 3배 높게 나타났다. 산출된 최적 정비주기를 적용하는 방안에 대해서는 현재 장비에 고장 식별을 위한 시간 단축과 실시간 장비운영상태를 운용자에게 제공하기 위한 자체점검기능(BIT: Built In Test)을 내장하고 있기 때문에 산출된 정비주기인 1.5년으로 적용하여도 문제점은 없을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 항공오일시험장비의 고장 데이터를 수리가능 시스템의 신뢰도 분석방법을 사용하여 분석하였으며, NHPP Power Law 모델에 대한 신뢰도 추정 및 적합도를 검정을 행하였다. 항공오일시험장비는 정비주기 간 고장이 발생하면 최소수리를 시행하므로, 최적 정비주기에 따른 효율적인 비용함수를 고려하여 최소비용 정비주기를 산출한 결과, 현재의 운용정비주기인 0.5년(6개월) 보다 3배 증가된 1.5년으로 나타났다. 이는 고장식별을 위한 시간을 단축하고 실시간 장비운영상태를 운용자에게 제공하기 위해 자체점검기능(BIT)을 내장하고 있기 때문에 예방 정비 주기를 1.5년으로 적용하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

본 논문에서 제시된 최소비용 정비주기 산출방법은 체계의 유지비용과 신뢰도를 고려한 정비정책을 결정하는데 있어 활용도가 높을 것으로 사료된다. 또한, 향후 고장모드 및 영향 분석을 통한 고장부품별 정비(교환) 주기 산출에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있으며, 무기체계 개발 단계의 RAM 분석 과정에서 자체점검기능(BIT)이 내장된 시스템과 그렇지 않은 일반 시스템을 구분하여 정비도를 분석하는 연구도 필요하다고 할 수 있다.

References

- [1] Department Of Defense (2009). “DoD Reliability, Availability, and Cost Rational Report Manual”. DoD.
- [2] Jang, G. D. (2010). “Logistics Management theory and practice”. Korea Institute for Defense Analyses Press.
- [3] Kim, J. C. *et al.* (2011). “The establishing method and mathematical model of the optimal maintenance period”. Agency for Defense Development.
- [4] Seo, S. K. *et al.* (2014). “Reliability Engineering”. Kyobo Book Centre.
- [5] Lim, T. J. (2005). “System Reliability Engineering”. Soongsil University Press.
- [6] USAF (2005) “Technical Manual for JOAP(TO 33-1-37-1)”. USAF.
- [7] BLACK STONE Lab (2016). “What is oil analysis”. <http://www.blackstone.com>

- p://www.blackstone-labs.com/what-is-oil-analysis.php.
- [8] AVweb (2016). "Oil Analysis: What It Can and Can't Do". <http://www.avweb.com/news/maint/185087-1.html>.
- [9] Reliasoft Corporation (2015). "Reliability Growth and Repairable System Data Analysis Reference". Reliasoft Corporation.
- [10] Department Of Defense (2005). "DoD Guide for achieving Reliability, Availability, and Maintainability". Department Of Defense.
- [11] Han, J. H., Kim, J. W. and Koo, J. S. (2015). "A Study on the Maintenance Policy Considering the Failure Data of the EMU Braking System and the Cost Function". *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 30, No. 3, pp. 13-19.
- [12] Larry, H. C. (1990). "Evaluating the Reliability of Repairable Systems". *Proceedings Annual R&M Symposium*.
- [13] National Defense University (1995). "Theory and application of weapon systems RAM". National Defense University.
- [14] Kim, I. S. (2015). "Recent change in the types of failures and preventive maintenance policy of aviation equipment". *The Korean Reliability Society Conference Proceedings*, pp. 339-344.
- [15] NCSL RP-1 (1996) "Establishment and Adjustment of Calibration Intervals". NCSL.