

# 무기체계의 고장률과 지원수준의 변화에 따른 운용가용도 변화 분석\*

탁정호 · 정 원†

대구대학교 산업경영공학과

---

## Analysis of Operational Availability under Changing Failure Rate and Supportability\*

Jung Ho Tak · Won Jung†

Department of Industrial and Management Engineering Daegu University

**Purpose:** Maintaining appropriate operational availability (Ao) is a key element of combat victory, but estimates vary according to estimation methods. The purpose of this study is to improve the accuracy of estimating operational availability by tracing the changes of the weapon system's failure rate, repair rate, and the level of logistic support.

**Methods:** In order to track the change in the operating availability, the MDT (mean down time) is modeled by adding the repair time and the ALDT (administration and logistic delay time) to the service time.

**Results:** Using the field data of the weapon system A operated by the ROKAF, the failure rate follows a non-homogeneous Poisson process that changes with time, and it is modeled considering the changing repair rate and the logistic support time.

**Conclusion:** The accuracy of the analytical results was verified by comparing the actual operating data with the estimated availability. The results of this study can be used to track and evaluate the availability in a realistic situation where the failure rate and maintenance rate continuously change in operating environment.

**Keywords:** Operational Availability, Reliability, Maintainability, Supportability, NHPP, Crow-AMSAA, Markov Analysis

### 1. 서론

무기체계의 운용가용도(Ao) 유지는 전투 승리의 핵심요소로서[1], 전 수명주기에 걸쳐 추정하기 위한 다양한 활동을 수행하고 있지만 추정방법에 따라 추

정 결과가 변화한다. 특히, 과도상태(transient state)의 운용가용도 추정은 어렵기 때문에 일정시점에서의 가용시간과 총 시간의 비율을 고려한 확률모델로서 추정이 필요하다[2]. 운용가용도 최적화와 확률모델을 활용한 운용가용도 추정방법은 지속적인 연구가

---

\* 본 논문은 방위사업청과 국과연의 지원(RAM 특화연구실)을 받아 수행된 연구 결과임.

† 교신저자 wjung2020@gmail.com

2017년 8월 31일 접수, 2018년 1월 11일 수정본 접수, 2018년 1월 12일 게재 확정.

이루어졌으며, Barlow and Proschan[3]은 특정시점에서의 시스템의 운용가용도를 확률적으로 분석하는 방안을 제안하였으며, MIL-STD-721[4]은 상태를 고려한 운용가용도 분석방법을 제안하였다 Lie *et al.*[5]은 운용가용도의 전수조사와 시스템적 접근방법 방안에 관한 연구를 통해 운용가용도 추정방법의 체계적인 절차를 제안하였다. 김인석 외[6]는 무기체계의 야전운영자료를 활용하여 항공무기체계의 제작 시 설정된 운용가용도 목표값과 실제 운용가용도의 차이를 줄이는 방법을 제안하였으며 윤희성 외[7]는 모델링을 통한 무기체계 운용가용도 예측 시 최적 임무 주기 설정 방안을 제안하였다.

정비개념을 고려한 운용가용도 모델링에 관한 연구도 지속적으로 이루어져 Fawzi and Hawkes[8]는 직렬식 시스템의 수리와 교체를 고려한 모델링 방안을 제안하였으며, Hairong and James[9]는 고장률이 와이블 분포를 따르는 경우 Markov Process를 활용한 모델링 방안을 제안하였다. 그러나, 운용가용도 분석 및 추정에 관한 연구들은 주로 정상상태(steady state)를 중심으로 발전해 왔으며, 고장률과 군수지원 구조가 시간에 따라 변화하는 경우의 운용가용도 분석방안을 제안하지는 못했다[5]. 실제로 운용가용도는 신뢰도(reliability), 정비도(maintainability) 및 지원도(supportability)의 관계식으로 나타나기 때문에 고장수리 시간 수리부속 재고 등 군수지원 여건과 밀접한 관계를 가진다 따라서, 전투임무 시에 요구되는 운용가용도 유지를 위해서는 세 가지 요소를 고려한 추정방안이 필요하다[1].

본 연구는 대한민국 공군이 운용중인 무기체계A의 운영데이터를 활용하여 고장률이 시간에 따라 변화하는 비동질적 포아송 과정(NHPP, Non-Homogeneous Poisson Process)[10]을 따르고, 군수지원 서비스를 변화하는 경우를 고려하여 모델링함으로써 보다 정확한 RAM 분석방안을 제안하였다. 실제로 공군은 월별로

운용가용도를 관리하고 있으며, 연구는 공군의 월별 운용가용도 측정값과 연구를 통해 제시된 방법으로 추정된 운용가용도 추정값의 비교를 통해 연구결과의 정확성을 입증하였다. 본 연구결과는 동일 시스템에 대해 고장율과 정비도가 지속적으로 변화하는 실제 상황에서 운용가용도를 추정 및 평가하는데 활용할 수 있으며, 지원도 요인을 고려한 향후 군 무기체계의 운용가용도 분석을 위한 중요 사례로 활용 가능할 것이다.

## 2. 체계의 고장률 모델

무기체계 A는 대한민국 공군이 조종사 양성을 목적으로 국내개발을 통해 운용중인 무기체계로서 2013년 11월부터 2016년 4월까지 48대를 대상으로 수집된 고장률  $\lambda_j$ 의 표본은 <Table 1>과 같다[11].

표본의 고장률이 시간에 따라 변하므로 Crow-AMSAA 모델[1, 12]을 활용하여 적합도 검정을 행하고 NHPP의 특성을 고려하여 모델링 하였다 <Table 1>에서처럼 무기체계A의 고장률이 시간에 따라 감소하는 추세를 나타내기 때문에 구간  $(t, t + \Delta t)$ 에서 고장강도 함수  $r(t)$ 는 식 (1)과 같다.

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

이 때  $\alpha$ 는 척도모수이고  $\beta$ 는 형상모수로서  $\beta < 1$ 의 경우 고장률은 감소하고  $\beta = 1$ 의 경우는 고장률이 일정하며,  $\beta > 1$ 의 경우는 고장률이 증가하게 된다

무기체계 A의 운용시간  $[0, T]$  동안의 기대고장수  $E[N(T)]$ 는 식 (2)와 같다.

$$E[N(T)] = \int_0^T r(t) dt = \alpha T^\beta \quad (2)$$

Table 1 The failure rate of weapon system A

Time	$\lambda_j$	Time	$\lambda_j$	Time	$\lambda_j$	Time	$\lambda_j$	Time	$\lambda_j$	Time	$\lambda_j$
1	0.285	6	0.228	11	0.203	16	0.145	21	0.128	26	0.198
2	0.323	7	0.171	12	0.185	17	0.192	22	0.180	27	0.171
3	0.237	8	0.240	13	0.203	18	0.210	23	0.176	28	0.201
4	0.256	9	0.286	14	0.211	19	0.211	24	0.144	29	0.183
5	0.284	10	0.248	15	0.269	20	0.190	25	0.174	30	0.159

따라서, 고장프로세스가 NHPP인 경우에  $N(T) = n$  가 될 확률은 포아송 확률로서 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{[E(N(T))]^n e^{-E(N(T))}}{n!}; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

만약  $N_q$ 를 시간 $[0, T]$  사이에  $q$ 번째 무기체계 A의 고장수라고 하고  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 최우추정법(MLE)으로 추정하면, 식 (4), 식 (5)와 같다[12].

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum_{q=1}^k N_q}{kT^{\hat{\beta}}} = 0.00699 \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{q=1}^k N_q}{\sum_{q=1}^k \sum_{i=1}^{N_q} \ln\left(\frac{T}{X_{iq}}\right)} = 1.84 \quad (5)$$

여기서,  $X_{iq}$ 는  $q$ 번째 무기체계 A의  $i$ 번째 고장발생시간이다.

모수추정결과에 따른 고장강도함수의 추정치는 식 (6)과 같다.

$$r(t) = 0.00699 \times 1.84 \times t^{0.84} \quad t > 0 \quad (6)$$

모델링에 결과에 대한 적합성 확인을 위해Cramer-von Mises Test를 적용하면[13]. 귀무가설( $H_0$ )과 대립가설 ( $H_1$ )은 식 (7)과 같다.

$H_0$ : 고장 Process가 NHPP를 따른다. (7)

$H_1$ : 고장 Process가 NHPP를 따르지 않는다.

형상모수 통계량을 계산하기 위한 추정식은 식(8)과 같으며, 적합도 검정 통계량은 식 (9)와 같다.

$$\bar{\beta} = \frac{M-1}{M} \hat{\beta} \quad (8)$$

$$C_M^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{i=1}^M \left[ \left( \frac{X_{iq}}{T_q} \right)^{\bar{\beta}} - \frac{2i-1}{2M} \right]^2 = 0.202 \quad (9)$$

여기서,  $M$ 은 관측된 총 수,  $T_q$ 는  $q$ 번째 무기체계 A에 대한 관측시간이고,  $X_{iq}$ 는  $q$ 번째 무기체계 A의 고장 발생시간 간격이다.

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

M	Significance Level( $\alpha$ )				
	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
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

각 유의수준에 대한  $C_M^2$ 의 임계값은 <Table 2>와 같다.

유의수준  $\alpha = 0.05$ ,  $M = 30$ 일 때 임계값은 0.218이며, 무기체계 A의  $C_M^2 = 0.202$ 이다.

따라서, 귀무가설( $H_0$ )이 채택되어, 무기체계 A의 고장률 분포는 NHPP에 적합하다고 할 수 있다.

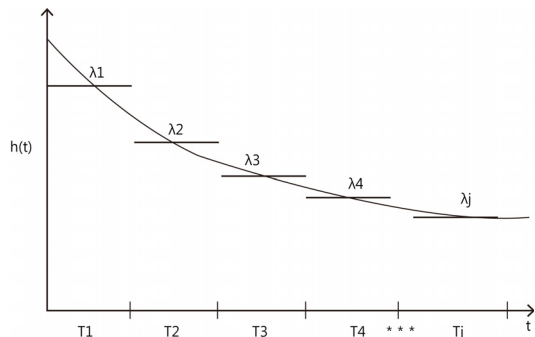
### 3. 구간 별 운용가용도 변화 모델

고장발생이 NHPP를 따르며, 고장률이 계단함수 형태인 시스템의 구간 별 운용가용도를Markov 프로세스로 모델링하면, <Fig. 1>와 같다.

구간 별 고장률 함수  $h(t)$ 는 식 (10)과 같으며, 확률 밀도함수  $f(t)$ 는 식 (11)과 같다[9].

$$h(t) = \begin{cases} \lambda_1 & t \leq T_1 \\ \lambda_j & T_j < t < T_{j+1} \quad (j > 1) \end{cases} \quad (10)$$

$$f(t) = \begin{cases} \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} & t \leq T_1 \\ k_j \lambda_j e^{-\lambda_j(t-T_j)} & T_j < t < T_{j+1} \quad (j > 1) \end{cases} \quad (11)$$



**Fig. 1** The parametric approach of failure rate

여기서,  $k_j$ 는  $\begin{cases} k_1 = e^{-\lambda_1 T_1} \\ k_j = k_{j-1} e^{-\lambda_j(T_j - T_{j-1})} \end{cases} (j > 1)$

일정한 수리율( $\mu$ )을 가지는 경우 운용가용도  $A(t)$ 는 식 (12)와 같으며, 추정된 수식을 통해 시스템의 고장발생이 NHPP를 따를 때 시스템의 월별 운용가용도 추정이 가능하다[9].

$$A(t) = \begin{cases} \frac{\mu/(\lambda_1 + \mu) + \lambda_1/(\lambda_1 + \mu) \exp[-(\lambda_1 + \mu)t]}{\mu/(\lambda_1 + \mu) + \lambda_1/(\lambda_1 + \mu) \exp[-(\lambda_1 + \mu)t]} & t \leq T_1 \\ \frac{\mu/(\lambda_j + \mu) + [A(T_j) - \mu/(\lambda_j + \mu)] \exp[-(\lambda_j + \mu)(t - T_j)]}{\mu/(\lambda_j + \mu) + \lambda_j/(\lambda_j + \mu) \exp[-(\lambda_j + \mu)(t - T_j)]} & T_{j-1} < t \leq T_j \end{cases} \quad (12)$$

#### 4. 수리 및 지원도를 고려한 운용가용도 변화

무기체계의 운용가용도를 일정수준으로 유지하기 위해서는 안정적인 군수지원이 필수적이다 지원도 요소는 신뢰도 및 정비도 요소를 제외하고 시스템 전체의 운용가용도에 직접적으로 영향을 미치는 요인이다. 일반적으로 무기체계의 운용가용도는 식 (13)의 앞부분으로 나타내며, 운용부대에서 시스템의 가동여부를 고려하면 식 (13)의 뒷부분과 같다[1].

$$A_o = \frac{OT + ST}{OT + ST + TPM + TCM + ALDT} \quad (13)$$

$$= \frac{MTBMA}{MTBMA + MDT}$$

여기서, ST: Standby Time

OT: Operating Time

TPM: Total Preventive Time

TCM: Total Corrective Time

ALDT: Administration and Logistic Delay Time

MTBMA: Mean Time Between Maintenance Actions

MDT: Mean Down Time

고장 프로세스가 NHPP를 따르며, 고장률이  $\lambda_j$  인 고장/수리 메커니즘을 가지는 시스템의 운용가용도를 모델링하기 위해, 정비의뢰 후 재사용 때까지 걸리는 불가동 시간 요소를 <Fig. 2>와 같이 서비스율( $\omega_j$ )

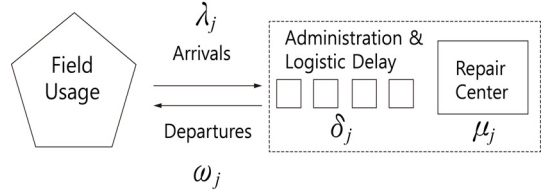


Fig. 2 Service mechanism

로 정하였다. 즉,  $\omega_j = (\mu_j + \delta_j)$ 이며,  $\delta_j$ 는 행정 및 군수지원시간(ALDT)이다.

식 (12)의 수리율( $\mu$ )을 서비스율로 대체하면, 운용가용도  $A_o(t)$ 는 식 (14)와 같다.

$$A_o(t) = \begin{cases} \frac{\omega_1/(\lambda_1 + \omega_1) + \lambda_1/(\lambda_1 + \omega_1) \exp[-(\lambda_1 + \omega_1)t]}{\omega_1/(\lambda_1 + \omega_1) + \lambda_1/(\lambda_1 + \omega_1) \exp[-(\lambda_1 + \omega_1)t]} & t \leq T_1 \\ \frac{\omega_j/(\lambda_j + \omega_j) + [A_o(T_j) - \omega_j/(\lambda_j + \omega_j)] \exp[-(\lambda_j + \omega_j)(t - T_j)]}{\omega_j/(\lambda_j + \omega_j) + \lambda_j/(\lambda_j + \omega_j) \exp[-(\lambda_j + \omega_j)(t - T_j)]} & T_{j-1} < t \leq T_j \end{cases} \quad (14)$$

여기서,  $\omega_j = (\mu_j + \delta_j)$  이다.

#### 5. 정비도 및 지원도의 변화에 따른 운용가용도의 변화

<Table 3>은 월별 고장률  $\lambda_j$ , 수리율  $\mu_j$ , 서비스율  $\omega_j$  인 무기체계 A의 운영데이터로 각각의 값들은 공군의 국산기 군수정보관리체계인 K-LIS에서 산출된 결과이다. 고장률은 월별 MTBF 값을 가지고 산출하였으며, 수리율은 월별 MTTR 값으로 산출하였다. 서비스율은 MTTR 값과 ALDT 값을 합하여 산출하였으며, ALDT 값은 부품의 고장시점부터 수리가 완료될 때까지의 시간 중 직접적인 수리작업을 하는 시간을 제외한 부품 보급까지의 시간과 정비행정 시간을 통해 산출하였다. 산출기간은 무기체계가 도입된 2013년 11월부터 2016년 4월까지 30개월이다[11].

모델링 시의 수리는 고장발생 후에 이루어지는 무기체계 A의 특성을 고려하여, 고장발생 시점 j월을 기준으로 하여, 해당 월에 수리가 완료되는 경우는 j월의 수리율 또는 서비스율을 적용하였으며 해당 월에 수리가 불가한 경우 수리시간을 고려하여 j+1월의 수리율 또는 서비스율을 적용하였다.

**Table 3** The failure rate, repair rate and service rate of weapon system A

Month	$\lambda_j$	$\mu_j$	$\omega_j$	Month	$\lambda_j$	$\mu_j$	$\omega_j$
1	0.285	0.490	0.0169	16	0.145	0.970	0.0138
2	0.323	0.555	0.0137	17	0.192	0.490	0.0136
3	0.237	0.833	0.0138	18	0.210	0.740	0.0138
4	0.256	0.751	0.0138	19	0.211	0.862	0.0138
5	0.284	0.833	0.0138	20	0.190	0.877	0.0138
6	0.228	0.813	0.0138	21	0.128	0.884	0.0138
7	0.171	0.826	0.0138	22	0.180	0.884	0.0138
8	0.240	0.826	0.0138	23	0.176	0.819	0.0138
9	0.286	0.826	0.0138	24	0.144	0.649	0.0137
10	0.248	0.929	0.0138	25	0.174	0.684	0.0138
11	0.203	0.591	0.0137	26	0.198	0.561	0.0137
12	0.185	0.680	0.0137	27	0.171	0.628	0.0137
13	0.203	0.704	0.0138	28	0.201	0.518	0.0137
14	0.211	0.694	0.0138	29	0.183	0.497	0.0136
15	0.269	0.719	0.0138	30	0.159	0.490	0.0136

**Table 4** The operational availability of weapon system A

Time	Ao(t)			Time	Ao(t)		
	Actual Value	Apply Repair Rate( $\mu_j$ )	Apply Service Rate( $\omega_j$ )		Actual Value	Apply Repair Rate( $\mu_j$ )	Apply Service Rate( $\omega_j$ )
1	0.545	0.924	0.685	16	0.979	0.847	0.869
2	0.708	0.905	0.714	17	0.859	0.964	0.828
3	0.73	0.946	0.773	18	0.880	0.957	0.814
4	0.817	0.938	0.759	19	0.891	0.957	0.813
5	0.796	0.925	0.740	20	0.873	0.965	0.83
6	0.823	0.95	0.780	21	0.853	0.983	0.843
7	0.856	0.971	0.829	22	0.868	0.968	0.818
8	0.822	0.945	0.773	23	0.849	0.969	0.821
9	0.821	0.924	0.761	24	0.851	0.979	0.849
10	0.821	0.942	0.769	25	0.827	0.97	0.823
11	0.818	0.96	0.799	26	0.848	0.962	0.805
12	0.85	0.966	0.814	27	0.861	0.971	0.827
13	0.835	0.96	0.799	28	0.868	0.961	0.822
14	0.841	0.957	0.793	29	0.862	0.967	0.831
15	0.851	0.932	0.780	30	0.881	0.975	0.839

무기체계 A의 월별 운용가용도의 실제값과 고장률  $\lambda_j$ , 수리율  $\mu_j$ , 서비스율  $\omega_j$ 를 적용하여, 식 (12)와 식 (14)를 통해 추정된 운용가용도는<Table 4>와 같다.

서비스율을 적용하여 모델링 하는 경우에 수리율을 적용하여 모델링 하는 경우보다<Fig. 3>에서 보는 것처럼 실제 운용가용도 값과 유사한 추정 값을 얻었다

운용가용도 추정 시 ALDT 값은 부품 보급까지의 시간과 정비행정 시간만이 고려되었기 때문에 부품검수, 하자처리 등 추가적으로 ALDT에 포함되는 요소들이 고려된다면, 서비스율을 적용한 운용가용도 추정결과와 실제 운용가용도의 감소할 것으로 판단 된다.

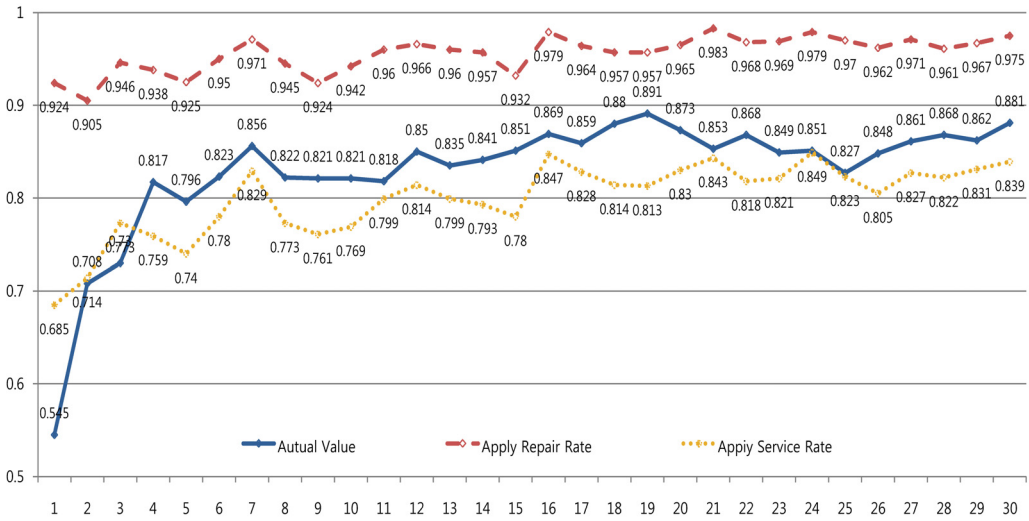


Fig. 3 Operational availability: actual value vs. estimate

실제로 무기체계 A의 하위 구성품 단위의 수리부속 하자처리 기간은 품목에 따라 최소 0.3일에서 최대 77일까지 변화하며, 향후 이 데이터를 포함하여 모델링하는 것이 반드시 필요하다.

더욱 정확하게 반영하는 방법에 대한 지속적인 연구가 필요하며, 이를 통해 시스템의 운용가용도에 대한 모델링의 정확도는 더욱 향상될 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구는 시스템의 고장발생이 NHPP를 따를 때, 지원도를 고려한 월별 운용가용도를 추정하는 방안을 제시하였다. 수리율( $\mu$ )과 ALDT를 합한 MDT를 서비스율( $\omega$ )로 정하여 시스템의 불가동 시간에 대한 운용가용도의 변화를 모델링하였다. 이 추정방법을 통해 변화하는 운용 상태를 반영한 현실적인 RAM 분석을 행하고, 정확도를 향상시켰다.

제시된 추정방법의 적합성을 입증하기 위하여 운용중인 무기체계 A의 실제 운용가용도와 모델링을 통한 운용가용도를 비교하였으며, 운용가용도 목표값 유지를 위하여 서비스율의 지속적인 관리방안을 수립하는 것에 대한 필요성을 제안하였다.

본 연구는 시스템의 효과적인 운용가용도 추정 방안을 제안하였으며, 시스템의 운용가용도 변화를 확인하는 방안에 대한 기초 연구로서 향후 군 무기체계의 운용가용도 분석 관련 연구 시 중요 사례로 활용될 수 있을 것이다. 향후 수리부속 부품검수, 하자처리 등 추가적인 서비스율에 포함되는 ALDT 요인을

## References

- [1] Department of Defence (2005). "Guide for Achieving Reliability, Availability, and Maintainability".
- [2] Comerford, N. (2005). "Crow/AMSAA Reliability Growth Plots And their use in Interpreting Meridian Energy Ltd's".
- [3] Barlow, R. and Proschan, F. (1965). "Mathematical Theory of Reliability". Wiley, New York.
- [4] Department of Defense USA. (1981). "Definitions of Terms for Reliability and Maintainability". MIL-STD-721.
- [5] Lie, C. H., Hwang, C. L., and Tillman, F. A. (1977). "Availability of Maintained Systems: A State-of-the-Art Survey[J]". IIE Transactions, Vol. 9, pp. 247-259.
- [6] Kim, I. S. *et al.* (2015). "Comparison of RAM Target Value and Operation Data in Air Weapon System". Journal of Applied Reliability, Vol. 15, No. 4. pp 282-288.
- [7] Yun, H. S. *et al.* (2011). "Methodologies of Duty Cycle Application in Weapon System Reliability Prediction".

- Journal of Applied Reliability Vol. 11, No. 4. pp 433-445.
- [8] Fawzi, B. B. and Hawkes, A. G. (1990). "Availability of a series system with replacement and repair[J]". Journal of Applied Probability, Vol. 43, pp. 873-887.
- [9] Hairong, S. and James, J. H. (2001). "Instantaneous availability and interval availability for systems with time-varying failure rate: stair-step approximation". Proceedings Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, pp. 371-374.
- [10] Fuqua, N. B. (2003). "The Applicability of Markov Analysis Methods to Reliability, Maintainability, and Safety". Selected Topics in Assurance Related Technologies, Vol. 10, pp. 1-8.
- [11] ROK Air force K-LIS System (2009). "Analysis of Aircraft and Weapon System Performance".
- [12] Larry, H. C. (1990). "Evaluating the Reliability of Repairable System". Proceedings Annual R&M Symposium.
- [13] [http://reliawiki.org/index.php/Repairable\\_Systems\\_Analysis](http://reliawiki.org/index.php/Repairable_Systems_Analysis).