

군 무기체계에서 정비 데이터를 이용한 측정신뢰도 모델의 F-검정 및 성능지수 기반 교정주기 분석 기법

차윤배¹ · 김부일^{2*}

Calibration Interval Analysis Method Based on F-test and Performance Index of Measurement Reliability Model Using Maintenance Data in Military Weapon Systems

Yun-bae Cha¹ · Boo-il Kim^{2*}

¹Department of Weapon Systems Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

^{2*}Department of Electrical, Electronics and Software Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

군 무기체계의 성능을 점검하기 위해 사용되는 정밀측정장비는 수명주기 동안 측정신뢰도 유지를 위해 주기적으로 교정된다. 기존의 교정주기 관련 연구들은 장비의 샘플 크기와 특성을 고려하여 측정신뢰도 모델을 결정할 것을 제안하고 있으나, 다양한 정밀측정장비의 정비 데이터에 동일한 특성 분포를 가정하고 단일 모델을 적용하는 것은 적합하지 않을 수 있다. 본 논문에서는 정밀측정장비의 수명주기 동안 육조 곡선의 특성을 가정하여 측정신뢰도 모델로부터 추정된 교정주기 가운데 F-검정과 성능지수 평가를 통해 정비 데이터에 가장 적합한 교정주기가 선택되도록 제안하였다. 제안한 방법을 다양한 장비에 적용한 결과 교정주기 동안 장비의 신뢰도가 유지됨을 확인하였다.

ABSTRACT

The PME(precision measurement equipment) used in the measurement to check the performance of the equipment in military weapon system is periodically calibrated to maintain measurement reliability during the life cycle. Previous studies suggest that reliability models are determined by considering sample size and characteristics of equipment. However, it may not be fit well to apply a single model assuming the same characteristic distribution for the maintenance date of many kinds of PMEs. This paper proposes that the most suitable calibration interval for maintenance data is selected through the F-test and the performance index evaluation among the calibration intervals estimated from the measurement reliability models assuming the characteristic of the bath-tub curve during the life cycle of various PMEs. The research results show that the reliabilities of various types of equipment are maintained during calibration intervals.

키워드 : 정밀측정장비, 교정주기, 신뢰도 모델, F-검정, 성능지수

Key word : Precision measurement equipment, Calibration interval, Reliability, F-test, Performance index

Received 04 September 2017, Revised 19 September 2017, Accepted 10 October 2017

* Corresponding Author Boo-il Kim (E-mail:bikim@pknu.ac.kr, Tel:+82-51-629-7819)

Department of Electrical, Electronics and Software Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.11.2191>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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 reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

군 무기체계에서 각종 시험, 측정 및 진단 목적으로 사용되는 정밀측정장비(PME, Precision Measurement Equipment)는 수명주기 동안 측정신뢰도(measurement reliability) 유지를 위하여 주기적으로 교정(calibration)을 수행하고 있다. 교정주기(calibration interval)는 해당 주기 동안 확률적으로 허용오차(tolerance) 이내로 유지될 수 있는 기간을 의미하며, 장비의 빈번한 주기적 교정은 장비의 측정신뢰도를 향상시키는 반면 비용의 상승을 가져온다. 현재 군에서 운용하는 무기체계는 특성상 미군으로부터 교정주기를 차용하여 적용하고 있다. 하지만 최근 획득 무기체계의 다변화 및 국내 연구개발로 인하여 차용 교정주기를 적용할 수 없는 품목이 증가하고 있으며, 차용주기의 적용이 불가한 품목은 제작사 권장주기 또는 불명확한 경우 12개월 미만으로 고정된 교정주기를 적용하고 있다[1]. 정밀측정장비는 교정 후 시간의 경과에 따라 운송, 취급, 사용 및 보관 등의 정년변화에 따른 불확실성의 증가로 측정신뢰도가 지속적으로 변화되며[2], 고정된 교정주기를 적용함으로써 장비의 수명주기 동안 측정신뢰도 유지에 문제점을 가지고 있다. 따라서 경제적 군 운용을 위해 장비의 신뢰목표(reliability target) 달성과 교정비용을 동시에 만족할 수 있는 최적화된 교정주기 설정 능력의 확보가 요구되는 실정이다. 교정주기 설정 관련 기존 연구들은 주기분석 집단의 크기와 장비 특성을 고려하여 측정신뢰도 모델을 결정하도록 추천하고 있다[2]. 다양한 정밀측정장비의 정비이력 데이터에 단일 측정신뢰도 모델을 적용하는 것은 장비의 동일한 특성을 가정하고 교정주기를 추정하는 것으로 일부 장비의 특성이 다른 경우 적합하지 않을 수 있으며, 모든 장비의 특성을 분석하는 것은 많은 비용과 시간이 요구되어진다.

본 논문에서는 정비 데이터를 기반으로 관측신뢰도(observed reliability) 데이터와 교정주기 추정에 사용된 측정신뢰도 모델들 간의 일치여부를 F-검정과 모델 성능지수(performance index) 평가를 통해 적합한 신뢰도 모델의 교정주기가 선택되도록 제안하였다. 이를 위하여 교정주기 설정방법과 관련한 기존 연구를 분석하고, 신뢰도 모델을 선정하여 교정주기를 추정하였으며, 제안한 F-검정과 모델 성능지수 평가를 통하여 교정주기가 최종적으로 선택되어지도록 하였다. 또한 제안한 분

석 기법에 대해 실제 정비 데이터를 사용하여 분석결과를 확인하였다.

II. 장비 교정주기 관련연구

2.1. 교정주기 분석 절차

정밀측정장비의 교정주기는 미군의 교정주기를 차용하여 적용하고 있으며, 미군은 국가표준시험소협회 NCSL(National Conference of Standard Laboratories)에서 발간된 교정주기 설정 지침인 RP-1(Recommended Practice-1)의 지수모델을 이용하여 교정주기를 분석하고 있다[3]. 그림 1은 RP-1에서 제안된 통계적 교정주기 분석절차로 정비이력 데이터를 사용하여 시간의 경과에 따른 측정신뢰도 분석, 분석된 관측 값에 측정신뢰도 모델링을 통한 교정주기 추정 및 추정된 값에 대한 신뢰구간을 설정하는 절차로 구성된다[2].

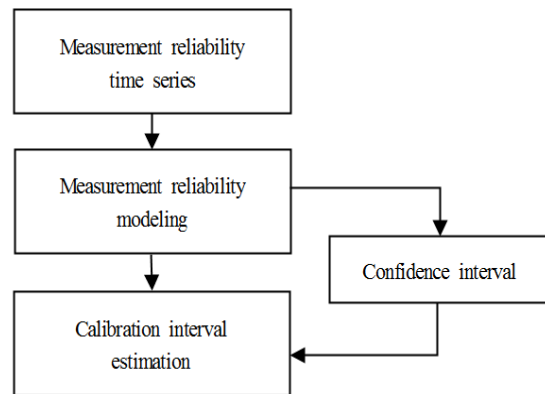


Fig. 1 Calibration interval analysis process

측정신뢰도 시간의 급수는 시간 t 에 상응하는 관측신뢰도를 $\tilde{R}(t)$ 로 나타낸다. t 주기에 기록된 표본의 허용오차 이내의 수를 $g(t)$, 표본의 크기를 $n(t)$ 이라고 할 때, 관측신뢰도는 식 (1)로 표현될 수 있으며, 관측 표본을 바탕으로 실제 측정신뢰도는 식 (2)와 같이 나타낸다[2].

$$\tilde{R}(t) = \frac{g(t)}{n(t)} \quad (1)$$

$$R(t) = \lim_{n(t) \rightarrow \infty} \frac{g(t)}{n(t)} \text{ 또는 } R(t) = E[\tilde{R}(t)] \quad (2)$$

여기서 시간간격 t_j , 교정대수 n_j , 허용오차 이내의 대수 g_j , 관측신뢰도 $R(t)$ 일 때, 표 1은 전형적인 허용오차 초과 시간의 급수 분석을 나타내었으며, $R(t)$ 는 시간의 경과에 따라 감소하는 경향을 보인다.

Table. 1 Typical out-of-tolerance time series

t_j	n_j	g_j	$R(t)$
2-4	4	4	1.00
5-7	6	5	0.83
8-10	14	9	0.64
11-13	13	8	0.61
19-21	22	12	0.54
26-28	49	20	0.41
37-40	18	9	0.50
48-51	6	2	0.33

시간의 급수 분석에 따라 관측된 신뢰도에 적합한 수학적 모델을 설계하는 것을 측정신뢰도 모델링이라고 하며, 모델링을 위해서는 고장률(failure rate) 파라미터 θ 를 추정하여야 한다. 기존 신뢰도 모델들 중 지수 모델의 시간간격 t_j 동안 허용오차를 초과하지 않을 확률은 식 (3)과 같이 주어진다[4, 5].

$$\Pr(\text{No failure before } t_j) = e^{-\theta t_j} \quad (3)$$

여기서 θ 는 고장률 파라미터로서 단순방법과 최대우도 추정(MLE, Maximum Likelihood Estimation)을 사용하여 해를 구할 수 있다. 식 (3)에서 주어진 θ 를 추정하는 단순방법은 식 (4)와 같이 주어진다.

$$\theta_0 = -\frac{1}{T} \ln\left(\frac{S}{N}\right) \quad (4)$$

여기서 θ_0 는 θ 의 추정치, T 는 평균 재 입고기간, S 는 허용오차 이내의 대수, N 은 해당 기간 내의 전체 교정대수이다.

최대우도 추정은 t_j 의 시간간격 경과 후 n_j 의 교정대

수 중에서 g_j 의 허용오차 이내의 대수가 나타날 확률로 이항 분포 법칙(binomial probability law)에 의해 주어지며, 우도 함수(likelihood function)는 식 (5)와 같이 표현된다[6].

$$L = \prod_{j=1}^m C_{g_j}^{n_j} (e^{-\theta t_j})^{g_j} (1 - e^{-\theta t_j})^{n_j - g_j} \quad (5)$$

여기서 m 은 시간간격의 수이며, 최대우도 추정 값은 θ 에 대하여 L 의 log의 미분계수를 0으로 설정하여 식 (6)과 같이 해를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial(\ln L)}{\partial \theta} = 0 \quad (6)$$

Weibull모델에서의 시간간격 t_j 동안 허용오차를 초과하지 않을 확률은 식 (7)과 같이 표현된다. 여기서 θ_1 은 형상모수(shape parameter), θ_2 는 척도모수(scale parameter)로 최대우도추정 방법을 사용하여 동일하게 해를 구한다[7].

$$\Pr(\text{No failure before } t_j) = e^{-(\theta_1 t_j)^{\theta_2}} \quad (7)$$

2.2. 교정주기의 추정

교정주기는 측정신뢰도 모델의 고장률 파라미터 θ 를 이용하여 추정하며, 지수모델 및 Weibull모델의 교정주기 추정 값은 식 (8)과 식 (9)와 같다[2,8].

$$i_0 = -\frac{1}{\theta_0} \ln R \quad (8)$$

$$i_0 = \frac{1}{\theta_1} [(-\ln R)^{\frac{1}{\theta_2}}] \quad (9)$$

여기서 R 은 신뢰목표로 경제성과 신뢰도를 고려하여 일반적으로 85% 또는 그 이상으로 설정한다[1,2]. 각종 측정신뢰도 모델에 대한 교정주기의 추정 방법은 다음과 같으며, 분석대상 장비의 특성에 따라 신뢰도 모델을 선택하여 적용할 수 있다[2].

- Exponential Model : $R(t, \hat{\theta}) = e^{-\hat{\theta}t}$

- Weibull Model : $R(t, \hat{\theta}) = e^{-(\hat{\theta}_1 t)^{\hat{\theta}_2}}$
- Restricted Random Walk Model :

$$R(t, \hat{\theta}) = \text{erf}(Q), Q(\hat{\theta}) = \frac{\hat{\theta}_1}{\sqrt{1 + \hat{\theta}_2(1 - e^{-\hat{\theta}_3 t})}}$$
- Warranty Model : $R(t, \hat{\theta}) = \frac{1}{\sqrt{1 + e^{\hat{\theta}_2(t - \hat{\theta}_1)}}$

III. 제안한 측정신뢰도 모델의 F-검정 및 성능 지수 기반 교정주기 분석 기법

3.1. 측정신뢰도 모델 선정

교정 대상 A장비군에 대한 측정 신뢰도 모델을 선정하기 위하여 관측된 정비이력 데이터의 시간 급수 분석에 따른 관측 신뢰도는 표 2와 같다. 표 2의 분석 자료로부터 각종 신뢰도 모델을 사용하여 A장비군의 측정 신뢰도를 분석한 결과는 그림 2와 같이 얻어지며, 측정 신뢰도는 모델들의 특성으로 인하여 시간의 경과에 따라 각각 다르게 나타난다. 일반적으로 장비의 고장률은 수명주기 동안에 욕조(bath-tub) 곡선으로 표현되며, 수명주기를 3개의 구간으로 구분할 경우 지수분포와 Weibull 분포로 대표될 수 있다[9,10].

군의 정밀측정장비는 크게 전자장비와 기계적 장비로 구분할 수 있으며, 다양한 장비의 교정주기 분석을 위해 욕조 곡선을 가정하여 지수모델과 Weibull 모델을 교정주기 분석의 신뢰도 모델로써 선정하였다. 또한 지수모델은 미군에서 사용하는 단순추정과 최대우도 추정으로 구분하여 분석을 수행하였다.

Table. 2 Time series analysis(A group)

t_j	n_j	g_j	$R(t)$
1	3	3	1.00
2	9	9	1.00
3	3	3	1.00
4	6	6	1.00
5	15	12	0.80
6	6	3	0.50
7	3	3	1.00
total	45	39	0.87

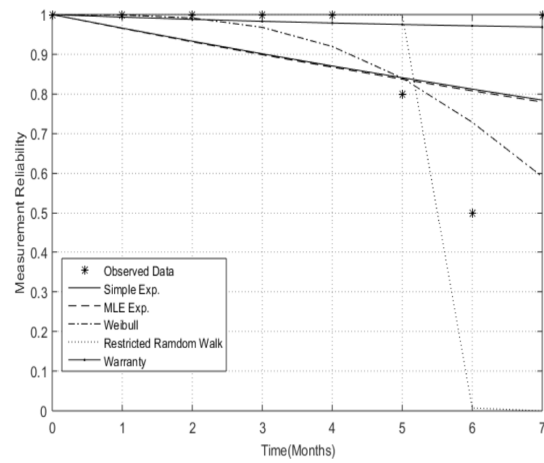


Fig. 2 Measurement reliability modeling(5 models)

3.2. 교정주기 추정

표 2의 측정신뢰도 시간의 급수 분석으로부터 신뢰도 목표를 85%로 설정할 때, 선정된 Simple Exp., MLE Exp., Weibull 함수를 사용하여 교정주기를 추정한 결과는 표 3과 같이 산출되었다.

Table. 3 Calibration interval estimation(A group)

Reliability model	Failure rate($\hat{\theta}$)		Interval (month)
	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_2$	
Simple Exp.	0.0346	-	4.69
MLE Exp.	0.0355	-	4.58
Weibull	0.1173	3.27719	4.89

현재 적용 교정주기가 3개월, 분석 대상 A장비군의 경우 Simple Exp. 방법에 의한 분석은 식 (4)을 사용하여 계산한다. 계산된 파라미터 추정 값에 따른 측정신뢰도 추정식은 $\hat{R}(t, \hat{\theta}) = e^{-0.0346t}$ 이며, 신뢰도 목표에 해당하는 신뢰도 모델의 교정주기는 4.69개월이다. MLE Exp. 방법에 의한 분석은 식 (6)을 사용하여 파라미터 값을 계산한다. 신뢰도 모델의 추정식은 $\hat{R}(t, \hat{\theta}) = e^{-0.0355t}$ 이며, MLE 추정식에 의한 교정주기는 4.58개월이다. 그리고 Weibull 방법을 적용한 신뢰도 모델의 추정식은 $\hat{R}(t, \hat{\theta}) = e^{-(0.1173t)^{3.2771}}$ 이며, 계산된 교정주기는 4.89개월이다.

그림 3은 분석결과에 대해 측정신뢰도 곡선과 관측 신뢰도 데이터를 그래프로 나타내었다.

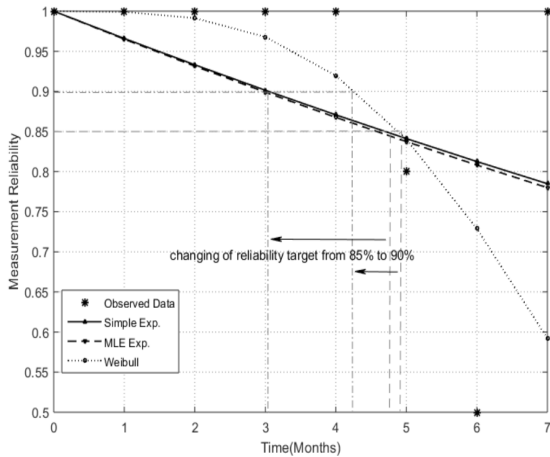


Fig. 3 Measurement reliability curve(A group)

그림 3에서 장비의 신뢰도 향상을 위해 신뢰목표를 85%에서 90%로 재설정할 경우 Simple Exp.과 MLE Exp.는 3개월, Weibull은 4개월로 서로 다른 교정주기가 추천되는 것을 알 수 있다. 정비 데이터로부터 B장비군의 측정신뢰도 시간의 급수 분석을 수행하면 표 4와 같다.

Table. 4 Time series analysis(B group)

t_j	n_j	g_j	$R(t)$
11	1	0	0.00
12	4	4	1.00
13	15	14	0.93
14	8	5	0.63
15	2	0	0.00
18	1	1	1.00
계	31	24	0.77

표 4의 측정신뢰도 시간의 급수 분석으로부터 신뢰 목표 85%에서 교정주기를 추정하면 표 5와 같이 계산되고, 시간에 따른 측정신뢰도는 그림 4와 같이 나타난다. B장비군의 신뢰목표를 유지하기 위해 추정된 교정주기는 Simple Exp.와 MLE Exp. 9개월, Weibull 12개월로서 현재 교정주기 12개월에서 3개월 단축 또는 변

경 없이 12개월을 적용할 수 있다.

Table. 5 Calibration interval estimation(B group)

Reliability model	Failure rate($\hat{\theta}$)		Interval (month)
	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_2$	
Simple Exp.	0.01916	-	8.48
MLE Exp.	0.01924	-	8.45
Weibull	0.04932	3.31000	11.71

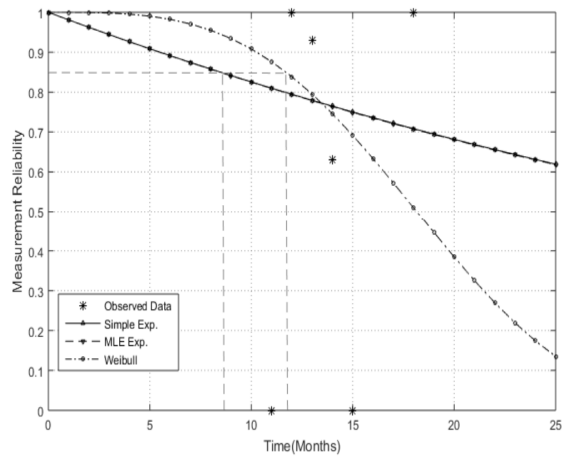


Fig. 4 Measurement reliability curve(B group)

IV. 교정주기 선택 결과 및 고찰

측정신뢰도 모델링을 통해 추정된 교정주기 가운데 적합한 교정주기를 선택하는 방법은 F-검정을 사용하여 모델의 적합여부를 판단하고, 두 가지 이상의 모델이 적합할 경우 모델 성능지수 계산을 통해 최적 교정주기를 선택하도록 하였다. 표 2의 데이터를 이용하여 측정신뢰도 모델과 관측 데이터 간의 적합성 판단을 위해 F-검정을 수행하였다. F-검정을 위해 통계적 가설로 “ H_0 : 신뢰도 모델이 적합하다.”와 “ H_1 : 신뢰도 모델이 적합하지 않다.”라고 귀무가설(null hypothesis)과 대립가설(alternative hypothesis)을 세우고, 관측 데이터와 신뢰도 모델 간 분산분석을 통해 귀무가설을 채택할 확률인 p 값을 계산하였다. 여기서 유의수준(significance level)은 $\alpha = 0.05$ 로 하였으며, p 값이 α 보다 작으면 귀무가설을 기각하고, 대립가설인 “신뢰도 모델이 적합

하지 않다.”라고 판단하였다. 분산분석은 관측 데이터 표본의 분포에 의한 순수오차 제곱합 ESS(Pure Error Sum of Squares), 모델산포에 의한 잔차 제곱합 RSS(Residual Sum of Squares) 및 적합결여 제곱합 LSS(Lack of Fit Sum of Squares)에 대해 식 (11)~(13)을 사용하여 수행하였다.

$$ESS = \sum_{i=1}^k n_i \tilde{R}_i (1 - \tilde{R}_i) \quad (11)$$

$$RSS = n_i [(\tilde{R}_i - \hat{R}_i)^2 + \tilde{R}_i (1 - \tilde{R}_i)] \quad (12)$$

$$LSS = RSS - ESS = \sum_{i=1}^k n_i (\tilde{R}_i - \hat{R}_i)^2 \quad (13)$$

여기서 n_i 는 i 번째의 표본이 개수, \tilde{R}_i 는 i 번째의 관측 신뢰도, \hat{R}_i 는 i 번째의 측정신뢰도 모델의 신뢰도 값이며, LSS의 분산분석 결과는 그림 5와 같이 나타난다.

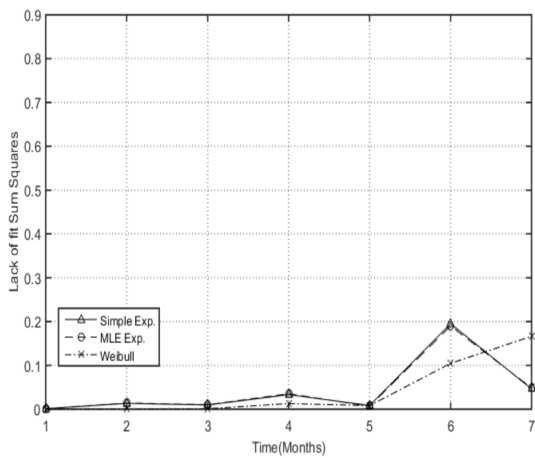


Fig. 5 LSS analysis of variance(A group)

LSS의 분산분석 값이 작을수록 관측 데이터에 신뢰도 모델이 적합하다고 판단할 수 있으며, 그림 5를 살펴보면 최대 분산 값은 Weibull 모델이 가장 작으나, 분산 분석 함은 $t = 7$ 값이 상대적으로 두 모델에 비해 높게 나타난다. F -검정을 수행하기 위해 순수오차 S_E^2 와 적합결여 오차 S_L^2 을 식 (14), (15)를 사용하여 계산하면

표 6과 같이 산출되어진다.

Table. 6 Analysis of variance(A group)

Model	LSS	S_E^2	S_L^2	F_0	p
Simple Exp.	0.3077	0.1625	0.0513	0.3156	0.911
MLE Exp.	0.3059	0.1625	0.0510	0.3137	0.913
Weibull	0.2934	0.1625	0.0587	0.3612	0.862

여기서 n 는 전체 표본의 수, m 은 파라미터의 수, k 는 시간 간격의 수이며, ESS의 자유도(degree of freedom)는 $n - k$, LSS의 자유도는 $k - m$ 이다.

$$S_E^2 = \frac{1}{n - k} \sum_{i=1}^k n_i \tilde{R}_i (1 - \tilde{R}_i) \quad (14)$$

$$S_L^2 = \frac{1}{k - m} \sum_{i=1}^k n_i (\tilde{R}_i - \hat{R}_i)^2 \quad (15)$$

확률변수 $F_0 = S_L^2 / S_E^2$ 는 자유도 $v_1 = k - m$ 과 $v_2 = n - k$ 에서 F 분포를 따른다는 것을 의미한다. 적합결여는 만약 S_L^2 이 S_E^2 보다 크다면 그 모델은 부적합하고, S_L^2 의 증가는 F 값의 증가로 나타난다. 여기서 p 값은 F 분포에서 F_0, v_1, v_2 일 때의 값이다. 표 6의 측정신뢰도 모델에서 계산된 p 값은 유의수준 0.05보다 모두 크므로 귀무가설을 기각할 수 없고, 신뢰도 모델은 모두 적합한 것으로 판정한다.

적합한 신뢰도 모델에서 추정된 교정주기 중 최적의 교정주기를 선택하는 방법으로 식 (16)에 따라 G 값 (Goodness Value)을 계산하고, 가장 큰 G 값을 갖는 측정신뢰도 모델의 추정주기를 채택한다.

$$G = \frac{N_G}{C} T_R^{1/4} \quad (16)$$

여기서 N_G 는 분석대상 그룹의 크기, C 는 거부신뢰수준으로 $1 - p$ 값, T_R 은 $1 - R$ 로 R 은 신뢰목표이며, T_R 은 신뢰목표를 85%로 설정할 경우 측정신뢰도 15% 지점의 시간을 의미한다. 식 (16)을 이용하여 각 모델별로 계산된 G 값은 표 7과 같다. G 값은 MLE Exp. 모델이 463.40으로 가장 큰 값을 나타내고, 여기서 추정된 4.58

개월이 최적 교정주기로서 선택되어진다. 성능지수의 평가는 거부신뢰수준이 낮으면서 경제적인 측면을 고려 상대적으로 긴 교정주기가 선택되어지도록 하였으며, 현장에서는 선택된 교정주기를 적용하여 장비를 주기적으로 교정한다.

Table. 7 Goodness of fit test(A group)

Model	p	C	N_G	T_R	G
Simple Exp.	0.9114	0.08861	15	54.80	460.58
MLE Exp.	0.9125	0.08751	15	53.42	463.40
Weibull	0.8615	0.13848	15	10.36	194.35

V. 결 론

논문에서는 군 무기체계의 각종 시험, 측정 및 진단 목적으로 사용되는 정밀측정장비에 대하여 수명주기 동안 측정신뢰도가 유지될 수 있도록 F-검정 및 모델 성능지수 평가에 의한 교정주기 분석 기법을 제안하였다. 교정주기 분석을 위한 측정신뢰도 모델은 군이 보유한 다수 장비의 고장률을 육조 곡선으로 가정하고, 수명주기 동안 일반적으로 대표할 수 있는 지수모델과 Weibull 모델을 선택하여 교정주기를 분석함으로써 단일 신뢰도 모델의 적용에 따른 추정오류를 보완하였다. 또한 동일 정비 데이터로부터 복수의 측정신뢰도 모델들에서 추정된 교정주기가 다른 경우 과학적 선택 기준으로 F-검정과 모델 성능지수 평가를 수행하여 최종적으로 정비 데이터에 적합한 교정주기가 선택되도록 하였다. 선택된 교정주기를 해당 장비에 적용한 결과 목표한 측정신뢰도가 유지됨을 확인하였으며, 설정된 교정주기에 대해 정비 데이터를 지속적으로 분석하고 재설정함으로써 장비의 신뢰목표가 유지되도록 관리할 수 있다. 이러한 방법은 각종 정밀측정장비의 측정된 정비 데이터를 사용하여 교정주기 분석에 적용할 수 있으며, 해당 장비군의 수명주기 동안 교정주기를 탄력적으로 적용함으로써 측정신뢰도 유지와 교정비용 감소로 인한 관련 방위산업에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Technical Manual, *Air Force Metrology and Calibration Program*, US AFMC, 2016.
- [2] NCSL Calibration Interval Committee, "Establishment and adjustment of calibration intervals, recommended practice RP-1," in *National Conference of Standard Laboratories*, pp. 27-76, 2010.
- [3] S. Brockway and T. Gorman, "Air force interval analysis of test, measurement and diagnostic equipment based on maintenance data collection," in *Proceedings of the 2008 NCSL International Workshop and Symposium*, pp. 1-5, 2008.
- [4] E. M. A. AI Reeshi, "Industrial engineering application in metrology : job scheduling, calibration interval and average outgoing quality," Ph. D. dissertation, School of Engineering and Design Brunel University, UK, 2013.
- [5] P. Carbone, "Performance of simple response method for the establishment and adjustment of calibration intervals," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 3, pp. 730-735, May 2004.
- [6] S. M. Shin and S. Uroosa, "Predicting software reliability using particle SWARM optimization technique," *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, vol.1, no.3, pp. 17-30, Sep. 2015.
- [7] C. Kim, "A Practical Guide to Adjusting Calibration Interval," in *Proceedings of the 2014 NCSL International Workshop & Symposium*, pp. 1-10, 2014.
- [8] H. Paul, "Cost Effective Calibration Intervals Using Weibull Analysis," in *Proceedings of the American Society for Quality Control 49th Annual Quality Congress*, pp. 1-12, 1995.
- [9] A. J. Lemonte, "A new exponential-type distribution with constant, decreasing, increasing, upside-down bathtub and bathtub-shaped failure rate function," *Journal of Computational Statistics & Data Analysis*, vol. 62, pp. 149-170, June 2013.
- [10] T. Zhang, R. Dwight, and K. El-Akruti, "On a Weibull related distribution model with decreasing, increasing and upside-down bathtub-shaped failure rate," in *Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 1-6, Jan. 2013.



차운배(Yun-Bae Cha)

2017 부경대학교 무기체계공학과 공학석사
2017~현재 부경대학교 무기체계공학과 박사과정
2014~현재 공군 군수시령부 제85정밀표준정비창 품질책임자
※ 관심분야 : 전기측정, 정밀측정, 항공기 수명관리



김부일(Boo-il Kim)

1985 경북대학교 전자공학과 공학석사
2001 경북대학교 전자공학과 공학박사
1985~2013 국방과학연구소 수석연구원
2013~현재 부경대학교 전기전자소프트웨어공학과 부교수
※ 관심분야 : 능동소나, 합성개구면소나, 수중음향대응, 정밀측정