

시스템 복잡도를 반영한 한국형 정비도 예측 방법론

권재언*, 허장욱*,#

*금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합전공)

Korean Maintainability Prediction Methodology Reflecting System Complexity

Jae-Eon Kwon*, Jang-Wook Hur*#

*Department of Mechanical Engineering (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering of Mechanical Engineering), Kumoh National Institute of Technology (Received 11 November 2020; received in revised form 16 December 2020; accepted 28 December 2020)

ABSTRACT

During the development of a weapon system, the concept of maintainability is used for quantitatively predicting and analyzing the maintenance time. However, owing to the complexity of a weapon system, the standard maintenance time predicted during the system's development differs significantly from the measured time during the operation of the equipment after the system's development. According to the analysis presented in this paper, the maintenance time can be predicted by considering the system's complexity on the basis of the military specifications, and the procedure can be Part B of Procedure II and Method B of Procedure V. The maintenance work elements affected by the system complexity were identified by the analytic hierarchy process technique, and the system-complexity-reflecting weights of the maintenance work elements were calculated by the Delphi method, which involves expert surveys. Based on MIL-HDBK-470A and MIL-HDBK-472, it is going to present a Korean-style maintainability prediction method that reflects system complexity of weapons systems.

Key Words : System Complexity(시스템 복잡도), Maintainability Prediction(정비도 예측), Mean Time To Repair(평균 수리시간), Maintenance Work Element(정비업무 요소)

1. 서론

오늘날의 무기체계는 과학기술의 빠른 발전과 함께 고성능, 고정밀화되었으며 현재도 빠르게 발전하고 있다. 이로 인해 무기체계 운영유지의 중요성이 대두되었으며, 개발자는 장비를 개발할 때 정비

용이성을 고려하여 고장 정비시간에 대한 요구사항을 만족하도록 설계한다. 체계개발 시 정비시간에 대한 정량적인 예측 및 분석을 수행하는 과정에서 정비도라는 개념을 사용하는데, 정비도는 숙련된 정비 요원이 규정된 절차에 따라 정비를 실시할 경우 지정된 기간 내에 어떤 체계가 요구하는 상태로 복구될 수 있는 확률로써 용이성, 정확성, 신속성, 안정성 및 경제성과 관련이 있다^{1,2)}.

무기체계의 정비도 예측은 정비성에 대한 내용과

Corresponding Author : hhjw@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7399

예측방법이 수록된 미 군사 핸드북에 제시된 절차에 따라 수행된다^[3]. 무기체계를 개발하는 국내 다수의 방산업체에서는 MIL-HDBK-472에 수록된 Procedure II를 적용하고 있으나, 미군은 Procedure V를 적용하고 있고, 국내에서도 항공 분야를 비롯한 일부 무기 체계에 대해서는 Procedure V를 적용한 사례가 발표되고 있다^[4].

기술발전예 따라 무기체계와 장비가 고도화 및 첨단화 추세에 있으며, 이는 정비부대의 인원 편제와 수리부속 재고 수준 등에 있어서 큰 영향을 미치므로, 정확한 정비도 예측이 요구되고 있다. 그러나 현재 무기체계의 정비도 예측은 1970년대에 제정된 미 군사 핸드북(MIL-HDBK-470A, MIL-HDBK-472)을 그대로 적용하고 있으며, 무기체계의 기술발전 추세 등에 대한 개념이 미반영되어 정확한 정비도 예측이 곤란하다^[4]. 따라서 본 연구에서는 미군과 한국군이 사용하고 있는 정비도 예측 군사규격인 MIL-HDBK-470A 및 MIL-HDBK-472에 수록된 Procedure II & V를 대상으로 신규 무기체계 개발 시 정확한 정비도 예측을 위해 시스템 복잡도를 반영한 한국형 정비도 예측 방안을 제시한다.

2. 정비도 예측 방법

2.1 정비도 예측 방법의 종류

MIL-HDBK-470A 및 MIL-HDBK-472에는 Procedure I~V로 분류하여 정비도 예측에 대한 전반적인 방법을 제공하고 있으며^[3], 체계의 운용환경과 조건에 부합하는 적절한 절차를 선택하도록 기술하고 있다. 그러나, 국내 방위 산업체 등 군 관련 분야에서는 방위사업청에서 발간한 RAM 업무지침서에 따라 Procedure II를 주로 사용하고 있고^[5], 미군에서는 Procedure V를 적용하고 있으므로, Procedure II & V를 대상으로 분석한다.

2.2 Procedure II

Procedure II의 적용 시점은 Table 1에 나타난 바와 같이 최종 설계단계이며, 예측 시 활용하는 정보에 따라 Part A와 Part B로 나누어진다^[4]. Part A는 MIL-HDBK-472에 수록된 정비업무 데이터 북을

Table 1 Prediction of maintenance according to procedure II^[4]

Division	Part A	Part B
Application	Detailed design stage	Detailed design stage
Features	Data book	Real measure data
Data acquisition	MIL-HDBK-472	Similar system experience data

활용하는 반면, Part B는 유사체계의 과거 경험자료를 활용하여 정비도(MTTR, Mean Time To Repair)를 산출한다^[3]. Procedure II의 정비업무 요소는 결합식별, 결합분리, 분해, 교환, 재조립, 조정 및 확인의 7가지로 구분할 수 있으며, MTTR은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다^[3].

$$\begin{aligned}
 MTTR &= \bar{T}_{FD} + \bar{T}_{FI} + \bar{T}_D + \bar{T}_I + \bar{T}_R + \bar{T}_A + \bar{T}_C \quad (1) \\
 &= \sum_{m=1}^M \bar{T}_m
 \end{aligned}$$

여기서, \bar{T}_{FD} : 평균 결합식별시간
 \bar{T}_{FI} : 평균 결합분리시간
 \bar{T}_D : 평균 분해시간
 \bar{T}_I : 평균 교환시간
 \bar{T}_R : 평균 재조립시간
 \bar{T}_A : 평균 조정시간
 \bar{T}_C : 평균 확인시간
 \bar{T}_m : 정비업무요소의 평균시간

2.3 Procedure V

Procedure V는 정비도 예측 시 적용 시점에 따라 Table 2에 나타난 바와 같이 Method A와 Method B로 구분할 수 있다. 2가지 방법 모두 MIL-HDBK-472에 수록된 정비업무 데이터 북을 활용하거나 유사체계의 과거 경험자료를 활용할 수 있으며, Method A는 신규개발 무기체계의 형상이 구체화가 미흡한 개발 초기에 적용하는 절차로써, RI(Replaceable Item) 수량과 결합부위 식별 가능 여부만을 고려한 모호성 파라미터(S)를 적용하여 정비도를 산출하고^[6], Method B는 신규개발 무기체계

의 형상이 구체화된 최종 설계단계에서 적용하는 절차로써, FD&I(Fault Detection & Isolation) 항목별 고장률을 반영하여 정비도를 예측한다⁷⁾.

Procedure V의 정비업무 요소는 준비, 결함분리, 분해, 교환, 제조립, 조정, 확인 및 가동의 8가지로 구분할 수 있으며, MTTR은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다⁶⁾.

$$MTTR = \bar{T}_P + \bar{T}_{FI} + \bar{T}_D + \bar{T}_I + \bar{T}_R + \bar{T}_A + \bar{T}_C + \bar{T}_{ST} \quad (2)$$

$$= \sum_{m=1}^M \bar{T}_m$$

- 여기서, \bar{T}_P : 평균 준비시간
- \bar{T}_{FI} : 평균 결함분리시간
- \bar{T}_D : 평균 분해시간
- \bar{T}_I : 평균 교환시간
- \bar{T}_R : 평균 제조립시간
- \bar{T}_A : 평균 조정시간
- \bar{T}_C : 평균 확인시간
- \bar{T}_{ST} : 평균 가동시간
- \bar{T}_m : 정비업무 요소의 평균시간

Procedure II와 Procedure V의 정비업무 요소를 비교하면, Procedure II의 평균 결함식별시간(\bar{T}_{FD})은 Procedure V의 평균 준비시간(\bar{T}_P)과 유사한 개념이나, Procedure V에는 Procedure II와 달리 평균 가동시간(\bar{T}_{ST})이 추가되어 있다⁸⁾.

Table 2 Prediction of maintenance according to procedure V^[8]

Division	Method A	Method B
Application	Initial design stage	Detailed design stage
Features	- Data book or real measure data - Apply S coefficient	- Data book or real measure data - Apply FD&I code
Data acquisition	- MIL-HDBK-472 - Similar system experience data	- MIL-HDBK-472 - Similar system experience data

3. 시스템 복잡도 모델링

MIL-HDBK-472에 수록된 데이터 북의 제원이나 유사체계의 경험자료를 신규 개발 무기체계에 그대로 적용 시에는 개발 당시 기술발전 추세의 미고려로 오차를 포함할 수 밖에 없으므로 시스템 복잡도를 추가적으로 고려할 필요가 있으며, 정비도 예측 절차별 시스템 복잡도 반영 가능성을 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. Procedure II의 경우 Part A는 데이터 북을 적용하기 때문에 시스템 복잡도를 정량적인 비교 파라미터로 반영이 곤란하나, Part B의 경우 유사체계의 경험자료를 활용하기 때문에 유사체계와 신규 개발 무기체계의 대상품목 비교 및 전문가 설문 등을 통해 시스템 복잡도를

Table 3 Applicability of system complexity^[6]

Type	Applicability	Reason
Procedure II	Part A	× - Using MIL-HDBK-472 Data book - Difficult to compare with system complexity
	Part B	○ - Use of similar system experience data - Applicable through comparison of similar system
Procedure V	Method A	× - Insufficiency of materialization due to initial design stage - Difficult to compare with system complexity
	Method B	○ - Use of similar system experience data - Applicable through comparison of similar system

Table 4 Maintenance work element relative importance survey (AHP)⁹⁾

No.	Maintenance work	Important ← Equal → Important									Maintenance work
		5	4	3	2	1	2	3	4	5	
1	Fault Detection (Preparation)	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Fault isolation
2	Fault Detection (Preparation)	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Disassembly
3	Fault Detection (Preparation)	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Interchange
4	Fault Detection (Preparation)	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Reassembly
5	Fault Detection (Preparation)	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Alignment
6	Fault Detection (Preparation)	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Check out
7	Fault Detection (Preparation)	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Start up
8	Fault isolation	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Disassembly
9	Fault isolation	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Interchange
10	Fault isolation	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Reassembly
11	Fault isolation	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Alignment
12	Fault isolation	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Check out
13	Fault isolation	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Start up
14	Disassembly	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Interchange
15	Disassembly	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Reassembly
16	Disassembly	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Alignment
17	Disassembly	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Check out
18	Disassembly	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Start up
19	Interchange	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Reassembly
20	Interchange	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Alignment
21	Interchange	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Check out
22	Interchange	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Start up
23	Reassembly	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Alignment
24	Reassembly	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Check out
25	Reassembly	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Start up
26	Alignment	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Check out
27	Alignment	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Start up
28	Check out	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Start up

반영할 수 있다.

또한, Procedure V의 경우 Method A는 초기 설계단계 적용으로 신규 개발 무기체계에 대한 구체화가 미흡하여 시스템 복잡도 반영이 곤란하나, RI 수량과 결합부위의 식별 가능여부에 따른 결합분리 확률을 계산하고, 모호성 파라미터(S)를 도출하여 MTTR 계산에 적용함으로써 시스템 복잡도와 유사한 불확실성을 정비도 예측 시 포함하고 있다고 볼 수 있다^[10]. 그리고 Method B는 Procedure II의 Part B와 유사하게 유사체계의 경험자료를 활용할 수 있기 때문에 유사체계와 신규 개발 무기체계의 대상 품목 비교 및 전문가 설문 등을 통해 시스템 복잡

도 반영이 가능하다.

Procedure II와 V의 8가지 정비업무 요소 중에서 시스템 복잡도에 큰 영향을 받는 정비업무 요소를 도출하기 위해 쌍대비교 기법인 AHP(Analytical Hierarchy Process) 분석을 수행하였다. AHP 분석은 해당 분야 전문가들의 정성적인 지식을 이용하여 경쟁되는 요소의 가중치 또는 중요도를 산출할 때 사용되는 효과적인 도구이다^[9]. 야전 정비요원 8명으로 하여금 Table 4에 나타낸 설문을 통해 시스템 복잡도에 영향을 받는 정비업무 요소의 상대적 중요도를 평가하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 표의 숫자는 상대적 중요도의 정량적인 크기

Table 5 Define and explain of maintenance elements related to system complexity(Procedure II & V)^[3]

Maintenance work	Definition	Relative importance(Rank)	System complexity
Fault detection (Preparation) *	Finding defective parts without auxiliary testing equipment	0.091 (5)	×
Fault isolation	Finding faulty precise location using auxiliary test equipment	0.207 (1)	○
Disassembly	Disassembly of equipment to access defective foams	0.163 (3)	○
Interchange	Removing defective items and installing replacement items	0.182 (2)	○
Reassembly	assembling process after exchange work	0.151 (4)	○
Alignment	Minimal testing & calibration work required for repairs	0.084 (6)	×
Check out	Minimal testing & inspection to determine if performance is recovering	0.071 (7)	×
(Start up) *	Operate the repaired and checked out system	0.051 (8)	×

(*) : It means Procedure V

Table 6 Maintenance work time table^[4]

Type	Fault detection(H)	Fault isolation(H)	Disassembly (H)	Reassembly (H)	Alignment (H)	Check out (H)
Part	0.021	0.265	0.313	0.436	0.156	0.175
Stage	0.029	0.315	0.231	0.362	0.077	0.167
Subassembly	0.037	0.394	0.165	0.262	0.045	0.158
Assembly	0.045	0.506	0.122	0.191	0.030	0.149
Unit	0.053	0.636	0.094	0.134	0.021	0.138
Group	0.063	0.776	0.071	0.090	0.015	0.124
Equipment	0.075	0.907	0.049	0.061	0.010	0.108
Subsystem	0.090	1.090	0.032	0.037	0.007	0.091
System	0.107	1.305	0.016	0.017	0.003	0.062
Total	0.520(4.8%)	6.194(56.7%)	1.093(10.0%)	1.590(14.5%)	0.364(3.3%)	1.172(10.7%)

로써 평균값을 표시하고 있고, 괄호 안의 숫자는 우선순위를 나타낸다. 표로부터 시스템의 복잡성이 정비업무에 직접적으로 영향을 미치는 요소는 결합분리, 분해, 교환 및 제조립 순으로 판단할 수 있으며, 결합식별(준비), 조정, 확인 및 가동은 시스템 복잡도와 연관이 적은 것으로 볼 수 있다.

또한 미 군사 핸드북에 정의된 시스템 수준별 정비업무 요소에 대한 소요시간을 Table 6에 나타내었다^[3]. 표에는 교환 시간이 미포함되어 있는데, 이는 품목의 개별 특성에 맞게 교환시간을 반영토록 하고 있기 때문에 제외되었으며, 표의 하단에는 정비업무 요소별 소요시간의 합계와 점유율을 괄호로 표시하고 있는데, 결합분리, 제조립 순으로 우선순위가 높게 제시되어 있다. 이러한 결과로부터 시스템 복잡도의 영향을 크게 받는 정비업무 요소는 교환, 결합분리, 제조립, 점검 및 분해 순으로 파악이 되나, 점검은 대부분 가동에 의한 육안검사 혹은 자체고장진단기능을 이용하여 수행하기 때문에 시스템 복잡도의 영향이 크지 않아

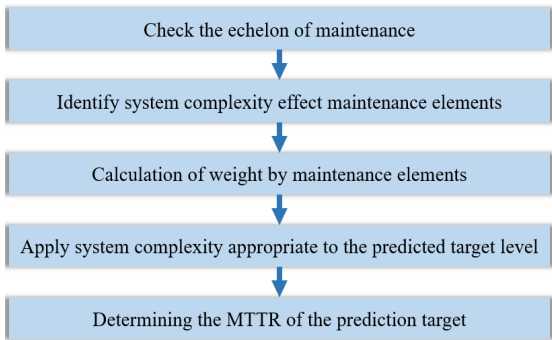


Fig. 1 Procedure of maintenance prediction reflecting the system complexity

배제하면, AHP 분석을 통해 도출한 결합분리, 분해, 교환 및 제조립과 일치함을 알 수 있다.

정비도 예측 시 시스템 복잡도를 반영하는 절차를 Fig. 1에 나타내었으며, 정비도 예측 절차인 Procedure II의 Part B와 Procedure V의 Method B를 대상으로 하고 있다. 먼저, 정비계단이 부대정비인지 야전정비인지 파악하여 해당 수준에 맞는 정비 대상품목을 선정하고, 시스템 복잡도에 영향을 받는 대상 정비업무(결합분리, 분해, 교환, 제조립 등)를 식별한다. 그리고 시스템 복잡도의 가중치는 대표적인 예측 분석기법 중 하나인 델파이 기법을 적용하여 도출한다. 델파이 기법은 여러 전문가의 의견을 수집, 교환하는 과정을 되풀이한 뒤 이를 발전시키는 방법으로 반복적인 환류를 통해 전문가들의 합의를 유도하는 것이 특징이다^[11]. 시스템 복잡도의 가중치를 델파이 기법으로 도출하기 위한 설문 문항을 Table 7에 나타내었으며, 이를 이용하여 대상의 수준에 알맞은 시스템 복잡도를 적용한 MTTR 계산을 통해 목표값의 구현 여부를 확인할 수 있다.

또한, 정비도 예측의 신뢰성 향상을 위해서는 정비업무 요소별 세분화된 분석이 요구된다. 즉, 기존에는 유사체계 과거 경험자료를 적용 시 Fig. 2와 같이 정비부대의 개별 정비업무 요소를 고려하지 않고 전체 정비업무를 대상으로 구성품별 경험자료를 적용하였다. 그러나 정확한 정비도 예측을 위해서는 정비부대의 정비수준과 세부 정비업무 요소를 고려한 시스템 복잡도의 반영이 요구된다. 즉, 부대정비의 경우 고장난 서브 시스템 교체에 의한 무기체계의 신속한 전투현장 복구를 위해 Fig. 3(a)와 같이 시스템 복잡도 반영이 요구되며, 야전정비

Table 7 Survey for calculating complexity factor (Delphi method)

Maintenance work	Question	Increase or decrease	Weight factor
Fault isolation	What percentage of the time required for "Fault Isolation" work is expected to increase or decrease compared to similar system?	() %	
Disassembly	What percentage of the time required for "Disassembly" work is expected to increase or decrease compared to similar system?	() %	
Interchange	What percentage of the time required for "Interchange" work is expected to increase or decrease compared to similar system?	() %	
Reassembly	What percentage of the time required for "Reassembly" work is expected to increase or decrease compared to similar system?	() %	

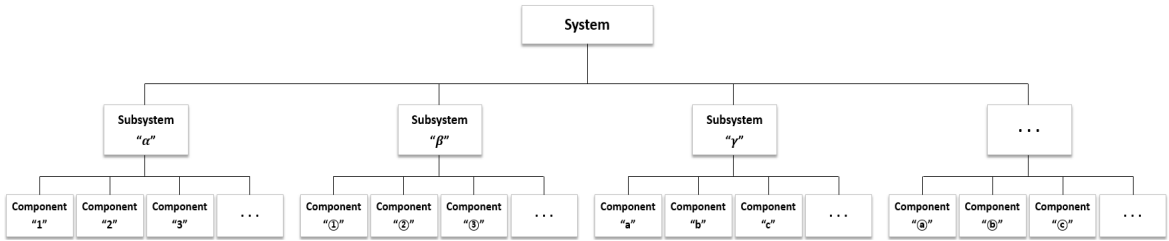
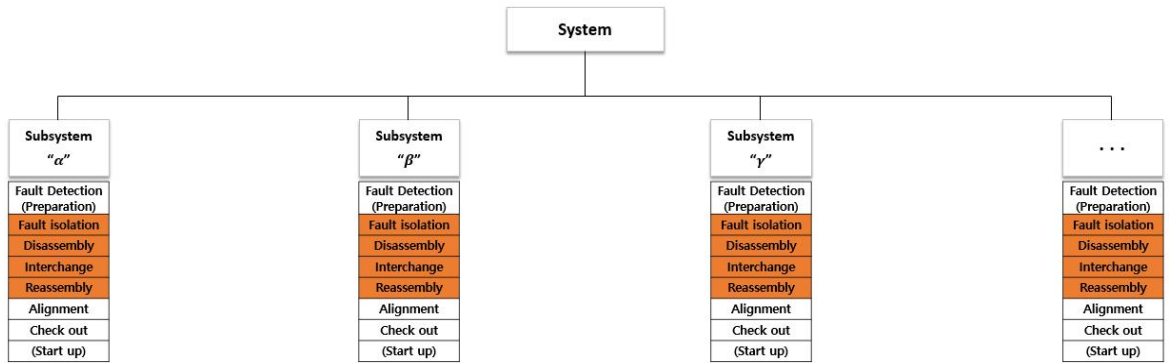
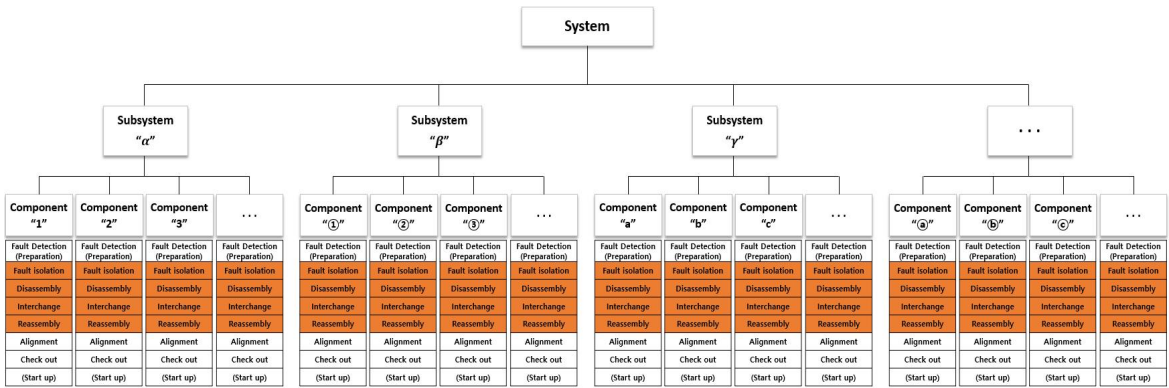


Fig. 2 Current method of maintainability prediction



(a) Organization maintenance



(b) Field maintenance

Fig. 3 Improved method of maintainability prediction

의 경우 고장난 구성품의 교환 혹은 수리 등에 의한 정비가 요구되므로 Fig. 3(b)와 같이 시스템 복잡도 반영이 필요하다. 아울러 무기체계 개발 간 시스템 복잡도를 적용하기 위해서는 편리한 도구 (Tool)의 개발이 필요하다. 이를 위해 본 연구내용을 반영하고 엔지니어가 편리하게 이용할 수 있는 정비도 예측 소프트웨어를 개발하기 위한 추가적

인 연구가 요구되고 있다.

4. 결론

정비도 예측 군사규격인 MIL-HDBK-470A 및 MIL-HDBK-472에 수록된 Procedure II & V를 대상으로 시스템 복잡도를 반영한 한국형 정비도 예측

방안을 제시하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 정비도 예측 관련 군사규격에서 시스템 복잡도를 고려할 수 있고, 절차는 Procedure II의 Part B와 Procedure V의 Method B가 가능하다.
- 2) 시스템 복잡도에 영향을 받는 정비업무 요소는 AHP 기법을 이용하여 결합분리, 분해, 교환, 재조립을 식별하였다.
- 3) 정비업무 요소에 시스템 복잡도 반영을 위한 가중치는 전문가 설문을 통한 델파이 기법을 적용하여 산출할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 Grand ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2021-2020-0-01612).

REFERENCES

1. Department of Defense, MIL-STD-721C: Definitions of Effectiveness Terms for Reliability, Maintainability, Human Factors, and Safety, Military Standard Washington (DC): Department of Defense (US), pp. 5, 1981.
2. Department of Defense, MIL-HDBK-338B: Electronic Reliability Design Handbook, Military Handbook Washington (DC): Department of Defense (US), pp. 5-44, 1998.
3. Department of Defense, MIL-HDBK-472 Military Handbook : Maintainability Prediction, Military Standardization Handbook Washington (DC): Department of Defense (US), pp. 2.11-2.29, 1966.
4. Kim, Y. S., Hur J. W., "The Development of a Maintainability Prediction Software Based on MIL-HDBK-472 Procedure II", Journal of Applied Reliability, Vol. 19, No. 2, pp. 160-166, 2019.
5. Defense Acquisition Program Administration, Weapon system RAM Task Guidelines, pp. 117, 2014.
6. Kim, Y. S., Hur J. W., "A Study on the Maintainability Prediction in the Initial Design Phase between Weapon System Development", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 22, No. 6, pp. 824-831, 2019.
7. Kim, S. J., Hur J. W., "A Study on the FD&I Calculation Method for the Maintainability Prediction of the Detailed Design Phase of a Weapon System", Journal of Applied Reliability, Vol. 20, No. 1, pp. 19-27, 2020.
8. Department of Defense, MIL-HDBK-470A Military Handbook : Designing and Developing Maintainable Products and Systems, Military Handbook Washington (DC): Department of Defense (US), pp. 4-12, 1997.
9. Lee, Y. K., Kim, K. A., Na, H. B., Park, J. W., "A Fuzzy AHP Based Decision Making Model for Ground Operations", Journal of the Korea Society for Simulation, Vol. 17, No. 4, pp. 159-165, 2008.
10. Kim, S. J., Hur, J. W., "Maintainability Prediction Software Development Using the Method A of MIL-HDBK-472 Procedure V", Journal of Applied Reliability, Vol. 20, No. 1, pp. 124-132, 2020.
11. Park, K. R., Chung, J. S., "A Study of Evaluation System of NATM Tunnel Using Delphi and AHP", Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection, Vol. 21, No. 6, pp. 25-34, 2017.